



ISSN 2307-4221

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТА
ELECTRIFICATION OF TRANSPORT

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 9 / 2015

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ



9 / 2015

Індекс 68641

ДНІПРОПЕТРОВСЬК

ISSN 2307-4221 (print)
ISSN 2312-6574 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 9 / 2015

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Передплатний індекс 68641

URL: <http://etr.diit.edu.ua/>

ДНІПРОПЕТРОВСЬК

№ 9, 2015

Видання Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України № 793 від 04.07.2014 р.
включений до Переліку наукових фахових видань України

Затверджений до друку Вченою радою університету
протокол № 11 від 22.06.2015 р.

Голова редакційної ради університету д.т.н., професор О. М. Пшінько

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

Сиченко В. Г. д.т.н., с.н.с., ДНУЗТ, Україна

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Кузнецов В. Г. д.т.н., професор, ДНУЗТ, Україна

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

ВІД УКРАЇНИ

Андрієнко П. Д. (Запорізький національний технічний університет);
Гетьман Г. К. (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна); Денисюк С. П. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»); Танкевич Є. М. (Інститут електродинаміки Національної академії наук України); Лежнюк П. Д. (Вінницький національний технічний університет); Костін М. О. (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна); Панасенко М. В. (Державний науково-дослідний центр Укрзалізниці); Саєнко Ю. Л. (Приазовський державний технічний університет); Сокол Є. І. (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); Максимчук В. Ф. (Головне управління електрифікації та електропостачання Укрзалізниці)

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ

Бадьор М. П. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бочков К. А. (Білоруський державний університет транспорту, Білорусь); Жарков Ю. І. (Ростовський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Омарбеков А. К. (Науково-дослідний центр Казахстантеміржолі, Казахстан); Сідоров О. О. (Омський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Васяк І. (Лодзинська політехніка, Інститут електроенергетики, Республіка Польща); Стележецькі Р. (Гданьський морський університет, Республіка Польща); Палечек Й. (Остравський технічний університет, Чеська республіка).

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Босий Д. О. к.т.н., доцент, ДНУЗТ, Україна

Видання виходить 2 рази на рік з червня 2011 р.

Божко В. В., Краснов О. О., Демченко С. В.

Особенности конструкции контактной сети переменного тока для скоростей движения 160–200 км/ч для железных дорог Украины..... 8

Божко В. В., Краснов А. А., Демченко С. В.

Construction features of AC contact network for driving speeds 160–200 km/h for the railways in Ukraine..... 8

Bozhko V.V., Krasnov A.A., Demchenko S.V.

Construction features of AC contact network for driving speeds 160–200 km/h for the railways in Ukraine..... 8

Большаков Ю. Л., Антонов А. В.

Диагностирование угольных токосъемных вставок в условиях эксплуатации 15

Большаков Ю. Л., Антонов А. В.

Diagnostic of current collector elements in exploitation 15

Bolshakov Y. L., Antonov A. V.

Diagnostic of current collector elements in exploitation..... 15

Денисюк С. П., Опришко В. П.

Интеграция показателей энергоэффективности в процесс оценки энергоэффективности в секторе транспорта..... 24

Денисюк С. П., Опришко В. П.

Indicators energy integration in energy evaluation process of transport 24

Denysiuk S. P., Opryshko V. P.

Indicators energy integration in energy evaluation process of transport 24

Кирилюк Т. І., Босий Д. О.

Схемна реалізація пристрою непрямого обліку втрат електричної енергії в контактній мережі..... 31

Кирилюк Т. И., Босый Д. А.

The scheme realization for the indirect metering of energy losses in a contact line..... 31

Kirilyuk T. I., Bosiy D. O.

The scheme realization for the indirect metering of energy losses in a contact line..... 31

Косарев Є. М.

Регулирование напряжения в контактной сети электрифицированных железных дорог постоянного тока..... 37

Косарев Е. Н.

Voltage control in a contact network of DC electrified railways 37

Kosarev E. M.

Voltage control in a contact network of DC electrified railways 37

Курган М. Б., Хмелевська Н. П., Байдак С. Ю.

Дослідження ефективності електрифікації одноколіїних залізниць для підвищення пропускної спроможності 44

Курган Н. Б., Хмелевская Н. П.,

Байдак С.Ю.

Research efficiency electrification single track railway to increase capacity 44

Kurhan M. B., Khmelevska N. P.,

Baidak S. Yu.

Research efficiency electrification single track railway to increase capacity 44

Мищенко Т. М.

Моделирование электромагнитных процессов в тяговой сети при пакетном движении скоростных поездов..... 50

Мищенко Т. Н.

Modeling of electromagnetic processes in traction network with batch-speed trains..... 50

Mishchenko T. M.

Modeling of electromagnetic processes in traction network with batch-speed trains..... 50

Прихода М. С.	
Дослідження вимикаючої здатності комутаційного обладнання тягової підстанції при приєднанні сонячної електростанції.....	62
Прихода М. С.	Prikhoda M. S.
Исследование отключающей способности коммутационного оборудования тяговой подстанции при присоединении солнечной электростанции	62
Сасенко Ю. Л., Попов А. С.	
Чисельний аналіз перехідних процесів у контурі нульової послідовності мереж власних потреб ТЕС	71
Саенко Ю. Л., Попов А. С.	Sayenko Yu. L., Popov A. S.
Численный анализ переходных процессов в контуре нулевой последовательности сетей собственных нужд ТЭС.....	71
	TPP
	71
електрорухомий склад / electric rolling stock	
Костін М. О., Нікітенко А. В.	
Енергія розгону електропоїзда постійного струму	81
Костин Н. А., Никитенко А. В.	Kostin M. O., Nikitenko A. V.
Энергия разгона электропоезда постоянно-го тока	81
	Energy of starting up to speed of DC train.....
	81
Лоза П. О., Гришечкіна Т. С.	
Оцінка якості виконання системи утримання локомотивного парку	87
Лоза П. А., Гришечкина Т. С.	Loza P. A., Grishechkina T. S.
Оценка качества выполнения системы содержания парка электроподвижного состава.....	87
	Estimation of the quality of implementation electric rolling stock maintenance system.....
	87
Сінчук О. М., Гузов Е. С., Сінчук І. О., Чорна В. О.	
До питання комплексності контролю параметрів функціонування електромеханічних систем шахтних електровозів	94
Синчук О. Н., Гузов Э. С., Синчук И. О., Черная В. О.	Sinchuk O. N., Guзов E. S., Sinchuk I. O., Chorna V.O.
К вопросу комплексности контроля параметров функционирования электромеханических систем шахтных электровозов.....	94
	To the question of the complexity of the control operation parameters of electromechanical systems of mine electric locomotives.....
	94
енергозбереження /energy saving	
Логвінова Н. О.	
Оптимізація ходової швидкості руху вантажних поїздів на залізничному напрямку в умовах енергооптимального графіку руху поїздів.....	102
Логвинова Н. А.	Logvinova N. A.
Оптимизация ходовой скорости движения грузовых поездов на железнодорожном направлении в условиях энергооптимального графика движения поездов	102
	Optimization undercarriage velocity of freight trains on railway direction under optimal by energy train schedule.....
	102
Маренич О. Л., Семенюк К. С.	
Альтернативне обігрівання навчальної лабораторії вищого навчального закладу	108
Маренич О. Л., Семенюк К. С.	Marenych O. L., Semeniuk K. S.
Альтернативный обогрев учебной лаборатории высшего учебного заведения.....	108
	Alternative heating laboratories the higher education institution
	108

автоматизація і діагностика / automation and diagnose

Матусевич О. О., Міронов Д. В.

Методика проведення ризик-аналізу технічного стану обладнання тягових мереж 115

Матусевич А. А., Міронов Д. В.

Matusevych O. O., Mironov D. V.

Методика проведения риск-анализа технического состояния оборудования тяговых сетей 115

Methodology of risk analysis the technical condition of traction networks equipment... 115

електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility

Саєнко Ю. Л., Калюжний Д. М.

Аналіз методів визначення фактичних внесків у зниження якості електричної енергії по несиметрії й несинусоїдальності напруг 123

Саенко Ю. Л., Калюжный Д. Н.

Sayenko Yu. L., Kalyuzhniy D. M.

Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжений 123

The analysis of methods for determining the actual contribution to lowering the quality of electric power through asymmetry and non-sinusoidal voltage 123

В. В. БОЖКО, О. О. КРАСНОВ, С. В. ДЕМЧЕНКО (ДНДЦ УЗ)

Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України, вул. І. Федорова, 39, м. Київ-38, 01038, Україна, тел. (044) 465-38-10, ел. пошта: bozhko_vv@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-3963-8461

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ ДЛЯ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ 160–200 КМ/ГОД ДЛЯ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ

Вступ

Одним з найважливіших напрямків розвитку транспортної інфраструктури залізниць України є електрифікація ділянок з інтенсивним рухом вантажних і пасажирських поїздів, а також оновлення пристроїв електропостачання на існуючих електрифікованих ділянках. Окремі лінії повинні стати полігонами прискореного та швидкісного руху пасажирських поїздів.

При підвищенні вагових норм та швидкостей руху змінюються умови роботи контактної мережі (КМ): розширюється температурний діапазон, зростають струмові та механічні навантаження. Динамічні процеси взаємодії КМ і струмоприймача суттєво впливають на якість струмознімання при швидкісному русі [1].

Разом з тим, слід відмітити ряд проблем, які не дозволяють забезпечувати ефективну роботу КМ на залізницях України:

- старіння та знос контактних мереж на значній частині електрифікованих ділянок УЗ є головною причиною їх незадовільної експлуатаційної надійності [2];

- при електрифікації вітчизняних залізниць використовуються типові проекти серії 7.501-1 «Контактная сеть электрифицированных железных дорог и воздушные линии на опорах контактной сети», розроблені інститутом «Трансэлектропроект» у 70–80 рр. минулого століття. Ряд технічних рішень, представлених у проектах, не відповідають сучасному рівню розвитку науки і техніки та потребують оновлення;

- необхідно розробити КМ для ділянок зі швидкісним рухом поїздів.

Аналіз світового досвіду проектування та експлуатації сучасних контактних мереж показав необхідність наближення вітчизняних норм і стандартів до міжнародних, перегляду розрахункових методик і принципів проектування, розробки нових технічних рішень і окремих вузлів та деталей контактної мережі, удосконалення системи технічного обслуговування та ремонту КМ.

Основні технічні характеристики контактної мережі

На замовлення Головного управління електрифікації та електропостачання (ЦЕ) «Укрзалізниці» фахівцями ДНДЦ УЗ здійснено розробку типових технічних рішень контактної мережі змінного струму для швидкостей руху 160–200 км/год (проект КМ-200-25). Розроблені проектні рішення включають в себе:

- схеми підвіски, спряжень та вузлів контактної мережі;

- конструкцію ізольованих горизонтальних консолей, їх робочі креслення, типорозміри, схеми встановлення і таблиці застосування;

- розрахунки консолей на міцність;

- каталог арматури контактної мережі змінного струму для швидкостей руху 160–200 км/год.

Для розв'язання поставленої задачі були проведені дослідження, які включали в себе вивчення зарубіжних нормативних документів, досвіду експлуатації аналогічних контактних підвісок в Росії та інших країнах, виконання інженерних розрахунків та проектування КМ. Результатом досліджень стали основні технічні характеристики і проектні параметри КМ-200-25.

Важливою задачею при проектуванні КМ є визначення натягу проводів. Використання методу допустимих напружень [3] не дозволяє реалізувати натяг, необхідний для КМ при високих швидкостях руху. Тому максимальний допустимий натяг розраховано методом граничних станів відповідно до стандарту EN 50119 [4]. Розрахункове значення натягу несучого тросу М-120 складає $T_{max} = 23,50$ кН, контактного проводу БрФ-120 $K_{max} = 23,67$ кН.

Основні технічні характеристики контактної мережі КМ-200-25 наведено в табл. 1.

За результатами розрахунків навантажень і згинальних моментів обрано опорні та підтримуючі конструкції залежно від умов застосування. Мінімальний радіус кривих при цьому прийнято 1500 м.

Розрахунок динамічних параметрів (табл. 2) показав, що при обраних значеннях натягу проводів КМ-200-25 відповідає європейським нормам [5].

© Божко В. В. та ін., 2015

**Основні технічні характеристики контактної
мережі КМ-200-25**

Найменування технічних характеристик	Параметри
Несучий трос (головні колії)	М-120
Натяг несучого тросу, кН	18
Контактний провід (головні колії)	БрФ-120
Натяг контактного проводу, кН	20
Струни, марка проводу струн	мірні регульовані, МГ-16 або ВЗІІ-10
Підсилюючий провід	2×АС-150 або А-185
Максимально допустимий тривалий струм контактної підвіски, А	1280
з підсилюючим проводом А-185	1536
Максимальна довжина прольоту, м	65
Конструктивна висота підвіски, мм	1800
Висота контактного проводу від рівня головки рейки (РГР), мм	6000
Стріла провисання контактного проводу в середині прольоту, мм	35
Допустимий середній знос контактного проводу, %	20
Максимальний місцевий знос контактного проводу, %	25
Максимально допустиме відхилення натягу несучого тросу, % на прямих ділянках на кривих	±5 ±10
Спряження анкерних ділянок неізолювані та ізолювані	3- або 4-прольотні
Максимальна довжина анкерної ділянки, м	1400 (2×700)
Відхилення висоти підвішування контактного проводу в опорних вузлах на суміжних опорах, мм, не більше	±30
Допустимі основні ухили контактного проводу при зміні висоти його підвішування (з перехідними 2–3 ділянками з ухилом 0,5 від вказаних)	0,001
Розрахункове приведенне натиснення струмоприймача, Н	120
Допустимий підйом контактного проводу в момент проходження стру- моприймача, мм	120
Максимально допустимий вільний підйом контактного проводу в опорному вузлі, мм	240
Допустимий інтервал температур (на перегоні / на станції)	120/100
Необхідність вертикального регулювання контактного проводу	при зносі 10%
Розрахункова швидкість руху, км/год	200

Таблиця 2

Динамічні параметри КМ-200-25 при швидкості 200 км/год

Найменування параметра	Норма	Розрахунок
Швидкість розповсюдження поперечної хвилі, км/год	не менше 330	481
Коефіцієнт відбиття	не більше 0,5	0,486
Коефіцієнт Доплера	не менше 0,28	0,413
Коефіцієнт підсилення	не більше 2	1,176

Конструкція контактної мережі

Схемні та конструктивні рішення КМ-200-25 мають ряд відмінностей від зарубіжних аналогів [6] та російського проекту КС-200-25 [7]. Це пояснюється дещо іншими технічними вимогами до КМ-200-25 та наявним асортиментом вузлів та деталей КМ, що випускаються вітчизняною промисловістю.

На рис. 1 зображена типова схема армування проміжної опори. Контактна підвіска головних колій перегонів і станцій – вертикальна компенсована, без ресорного тросу. На опорах можуть підвішуватися проводи ДПР, екрануючі та підсилюючі проводи.

У КМ-200-25 передбачається застосування проводів з підвищеними механічними властивостями:

– несучого тросу (НТ) М-120 з натягом 18 кН, розривне зусилля не менше 43,6 кН;

– контактного проводу (КП) БрФ-120 з натягом 20 кН, опір при розтягненні не менше 411,6 Н/мм².

Проектне положення контактного проводу, а також задовільний струмозподіл між проводами підвіски забезпечується за допомогою мірних струмопровідних струн (рис. 2), регульованих по довжині. Матеріал струн – багатодротовий мідний гнучкий провід МГ-16 або бронзовий ВЗП-10. Розташування струн, їх довжина і міжструнові прольоти визначаються при робочому проектуванні і оформлюються у вигляді монтажних карток для кожного прольоту.

Електричні з'єднувачі між НТ, КП та підсилюючим проводом повинні встановлюватися в прольотах анкерованих гілок спряжень, з обох боків від середньої анкеровки і додатково посередині між вказаними місцями. Матеріал електричних з'єднувачів – провід М-95.

Спряження анкерних ділянок виконуються 3- або 4-прольотними, залежно від довжини перехідного прольоту. Ізолюючим елементом на спряженнях із секціонуванням є натяжні полімерні ізолятори. Консоли на перехідних опорах повинні встановлюватися на окремих опорах для кожної підвіски.

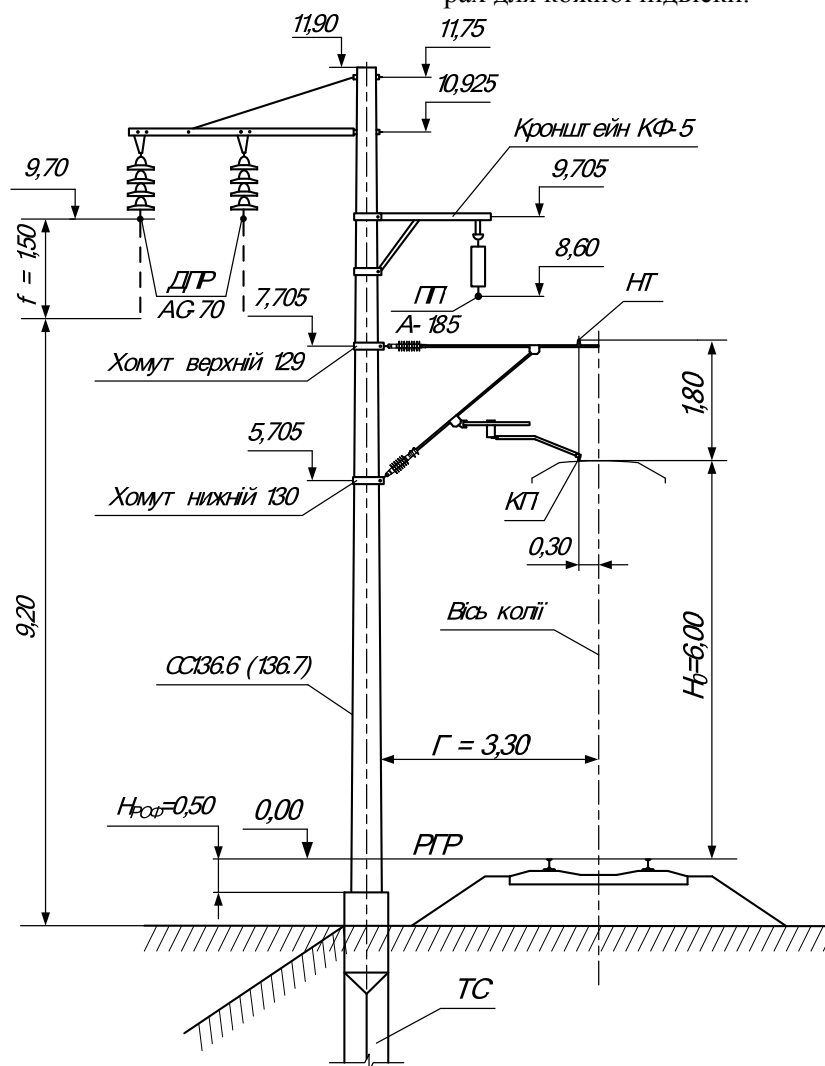


Рис. 1. Армування проміжної опори з нормальним габаритом на прямій. Насип, нульове місце

© Божко В. В. та ін., 2015

Нейтральна вставка для моторвагонної тяги може виконуватися у двох варіантах: із спряженнями або з секційними ізоляторами підвищеної довжини.

Анкеровка несучого тросу і контактного проводу є роздільною в різних рівнях. У проекті передбачено виконання вузла анкерівки із залізобетонними або з чавунними вантажами, розроблено графіки регулювання положення вантажів при монтажі. Компенсацію температурних переміщень НТ і КП забезпечує блоково-поліспастичний компенсатор КП-3-30 з коефіцієнтом передачі 3:1 і максимальним робочим навантаженням 30 кН. Заспокоювач вантажів виконується тросовим.

У якості опорних конструкцій в проекті прийнято залізобетонні опори СС136.6 (136.7) на фундаментах типу ТС-100, ТС-120. Габарити проміжних опор, як правило, типові 3,3 м і 4,9 м. У обґрунтованих випадках допускається встановлення опор з габаритом 5,7 м. Габарити анкерних опор повинні вибиратися так, щоб відхилення анкерованої підвіски від її напрямку в горизонтальній площині вздовж колії в перехідному прольоті не перевищувало 5°.

Консолі контактної підвіски ізольовані горизонтальні. Передбачено три серії консолей: без підкосу ІГ, з підкосом ІГП та консолю середньої анкерівки ІГС. У консолях використовуються зчленовані прямі фіксатори ФІП, зворотні ФІЗ та анкерні ФІА.

Типова консоль (рис. 3), складається з горизонтального стрижня 1, до якого через поворотний затискач 4 кріпиться несучий трос (а на консолях ІГС також трос середньої анкерівки несучого тросу), похилого стрижня 2, та підкосу 3. З'єднання стрижнів між собою, а також з

підкосом та фіксатором 5 виконується за допомогою спеціальних вузлів. При габариті опори більше 4,5 м консолю встановлюються на спеціальних подовжувачах 7. Залежно від місця встановлення фіксатори кріпляться до консолей за допомогою жорстких розпірок 6 або підтримуючих струн.

Консолі, основні стрижні фіксаторів та жорсткі розпірки виготовляються із сталей безшовних холоднодеформованих труб по ГОСТ 8734-75 і мають захисне цинкове покриття.

Вимоги до арматури КМ, застосованої в проекті, визначаються ГОСТ 12393-77 та Технічним завданням на проектування КМ-200-25, затвердженим ЦЕ 27.11.2008 р. Арматура, що сприймає натяг проводів подовжньої підвіски, повинна забезпечувати міцність заділу не менше 90% від розривного зусилля проводів.

Арматура повинна виконуватися методом лиття зі сталі або чавуну марок КЧ-33-8 або ВЧ-40. Кріпильні вироби (болти, гайки і шайби) повинні мати захисне цинкове покриття [8]. Деталі, що з'єднуються з бронзовим контактним проводом, допускається виготовляти з бронзи або латуні.

Останнім часом вітчизняними виробниками освоєно виробництво ряду нових деталей КМ. Зокрема, ТОВ ЛМЗ «ВЕСТА» розроблено бронзові затискачі для електричних з'єднувачів, затискач середньої анкерівки несучого тросу (рис. 4), безболтові затискачі. При виготовленні цих деталей застосовується технологія об'ємного гарячого штампування. Це забезпечує підвищення механічної міцності матеріалу, стабільність якості, оптимізацію виробів по масі та габаритам. Такі деталі знайшли широке застосування у вузлах КМ-200-25.

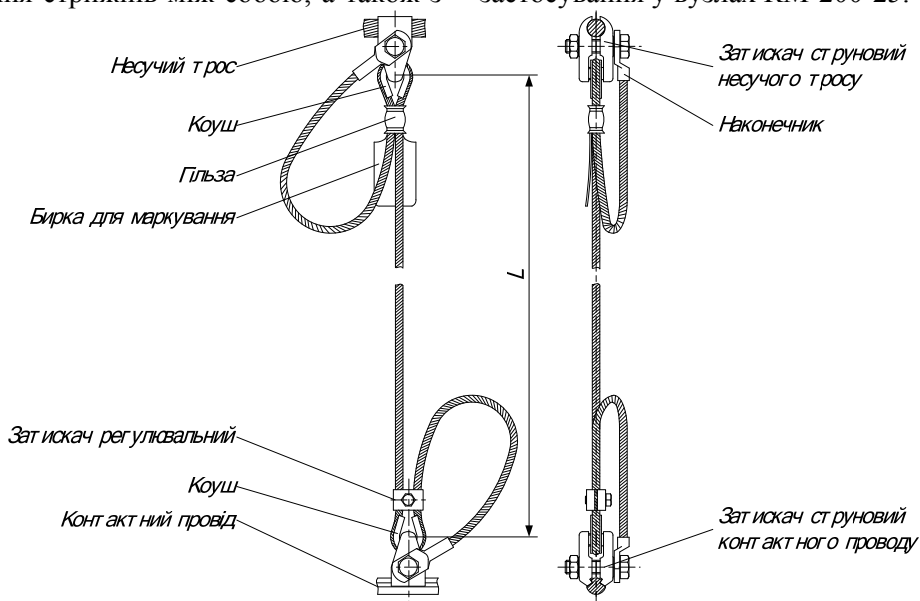


Рис. 2. Струна мірна регульована

© Божко В. В. та ін., 2015

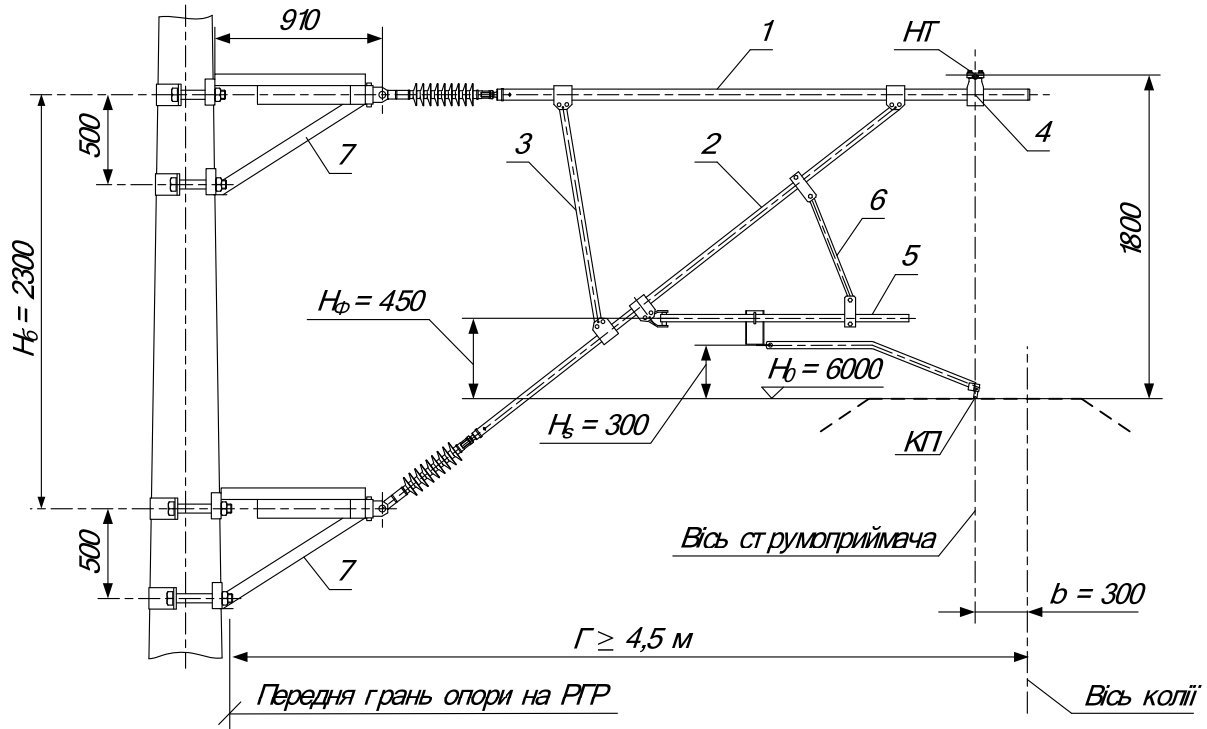


Рис. 3. Схема встановлення консолі на опорі із збільшеним габаритом

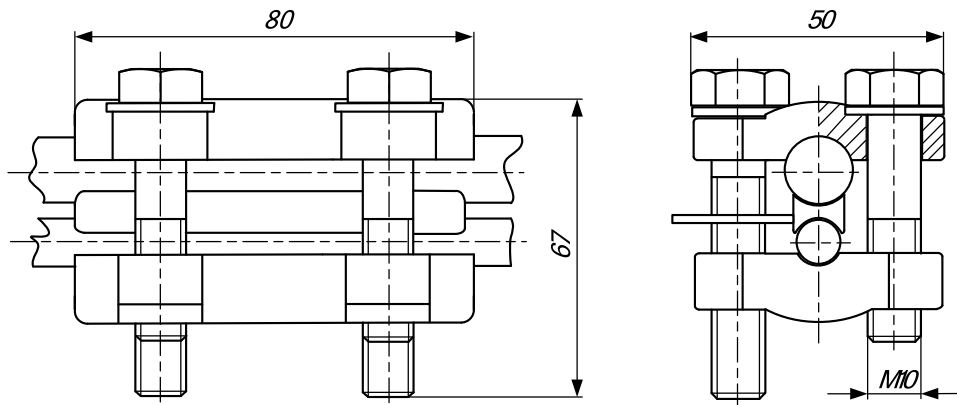


Рис. 4. Затискач середньої анкерівки несучого тросу 052-9

Контактна підвіска на станціях повинна закріплюватися на жорстких поперечинах з використанням консольних стійок, що виключає механічний зв'язок підвісок сусідніх колій. На з'їздах між головними коліями і коліями, що примикають до них, повинні встановлюватися секційні ізолятори з погонною масою 4 кг/м.

Технологія монтажу проводів контактної підвіски і поздовжнього регулювання повинна забезпечувати мінімальне відхилення від проектного натягу. На кожній анкерній ділянці натяг несучого тросу у компенсаторів повинен відповідати розрахунковому.

Розробка та практичне відпрацювання технології спорудження швидкісної контактної мережі, а також методів діагностики її параметрів на сьогодні залишаються актуальними науково-технічними задачами.

Висновки

Результатом проведених досліджень та розробок стали типові технічні рішення контактної підвіски змінного струму для швидкостей руху поїздів 160–200 км/год. Окремі вузли та деталі КМ-200-25 можуть успішно використовуватись при реконструкції ділянок залізниць зі швидкостями руху до 160 км/год. У рамках подальшої роботи над проектом планується розробка вузлів контактної мережі на станціях та анкеровок контактної підвіски на металевих опорах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Миронос, Н. В. Токосъем и тяговое электро-снабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе / Н. В. Миронос, П. Г. Тюрнин; Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». – Москва: Интекст, 2010. – 192 с.
2. Корниенко, В. В. Эксплуатационная надежность контактных сетей переменного тока железных дорог Украины / В. В. Корниенко, И. В. Доманский // *Залізничний транспорт України*. – 2009. – Вип. 4. – С. 22–27.
3. ВБН В.2.3-3-2009. Споруди транспорту. Контактна мережа. Норми проектування. – Затв. Наказом МТЗУ від 04.08.2009 № 826. – Київ, 2009. – 188 с.
4. EN 50119:2009. Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines. — European Standard, CELENEC, 2009.
5. 2002/733/EC. Commission decision of 30 May 2002 concerning the technical specification for interoperability relating to the energy subsystem of the trans-European high-speed rail system referred to in Article 6 (1) of Directive 96/48/EC // *Official Journal of the European Communities*. — 12.09.2002. — L 245 / P. 280–369.
6. Design of high speed overhead contact lines and its execution in projects [Electronic resource]. – Mode of access: www.uic.org/apps/presentation/tessun.pdf. – Title from the screen. – Date of Access: 20.06.2014.
7. Беляев, Н. В. Новые типовые проектные решения «УКС» по контактным сетям КС-200 и КС-160 / Н. В. Беляев, Д. И. Черединов // *Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте: тезисы докл. шестого международного симпозиума «Элтранс-2011»*. – СПб.: ПГУПС, 2011. – 14 с.
8. Шеремет, О. П. Удосконалення арматури контактних підвісок для поліпшення струмознімання в умовах швидкісного руху / О. П. Шеремет, В. О. Дьяков, В. Г. Сиченко // *Електрифікація транспорту: тези докл. міжнарод. научно-практ. конф. (3.06 – 5.06.2009)*. – Мисхор, 2009. – С. 70–71.

Надійшла до друку 12.05.2015.

REFERENCES

1. Mironos N. V., Tyurnin P. G. Tokosyem i tyagovoe elektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyannom toke [Current collection and traction power during high-speed driving at a CC]. Moscow, Intekst Publ., 2010. 192 p.
2. Korniyenko V. V., Domanskiy I. V. Ekspluatatsionnaya nadezhnost kontaktnyh setey peremennogo toka zheleznih dorog Ukrainy [Operational reliability catenary AC railways of Ukraine]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy — Railway transp. of Ukraine*, 2009, issue 4, pp. 22–27.
3. VBN V.2.3-3-2009. Sporudy transportu. Kontaktna merezha. Normy proektuvannya [Transp. facilities. Contact network. Design standards]. Kyiv, Standartinform Publ., 2009. 188p.
4. EN 50119:2009. Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines — European Standard, CELENEC, 2009.
5. 2002/733/EC. Commission decision of 30 May 2002 concerning the technical specification for interoperability relating to the energy subsystem of the trans-European high-speed rail system referred to in Article 6 (1) of Directive 96/48/EC. *Official Journal of the European Communities*. 12.09.2002, L 245, P. 280–369.
6. Design of high speed overhead contact lines and its execution in projects. Available at: www.uic.org/apps/presentation/tessun.pdf. (Accessed 20 June 2014).
7. Belyaev N. V., Cherednikov D. I. Novye tipovye proektnye resheniya «UKS» po kontaktnym setyam KS-200 i KS-160 [New model design decisions "UCN" on contact networks CN-200 and CN-160]. *Tezisy shestogo mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans-2011. Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov na zheleznodorozhnom transporte»* [Sixth Int. Symposium "Eltrans 2011. Electrification and energy infrastructure traction trains in rail transport"]. SPb., PGUPS Publ., 2011. 14 p.
8. Sheremet O. P., Dyakov V. O., Sychenko V. G. Udoshonalennya armatury kontaktnykh pidvisok dlya polipshennya strumoznimannya v umovakh shvydkisnogo rukhu [Improving reinforcement pin suspension to improve the current collection in terms of high-speed traffic]. *Tezisy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Elektrifikatsiya transporta (3.06 – 5.06.2009)"* [Proc. of the Int. Scientific and Practical Conf. "Electrification of transport"]. Mishor, 2009, pp. 70–71.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

Ключові слова: швидкісний рух; контактна мережа; консоль; анкерна ділянка; несучий трос; контактний провід.

У статті розглянуто особливості конструкції контактної мережі змінного струму для швидкостей руху 160–200 км/год для залізниць України. Значна частина електрифікованих залізниць України потребують оновлення контактної мережі. У ДНДЦ УЗ розроблено проект контактної мережі змінного струму для швид-

© Божко В. В. та ін., 2015

кісного руху (КМ-200-25). У результаті проведених досліджень визначено її основні технічні характеристики та проектні параметри. При цьому використовувалися зарубіжні нормативні документи, світовий досвід проектування та експлуатації аналогічних контактних мереж. Головні конструктивні відмінності КМ-200-25 від традиційних підвісок — підвищений натяг несучого тросу і контактного проводу, використання мірних струмопровідних струн, регульованих по довжині, компенсована роздільна анкерівка. Розроблено конструкцію ізольованих горизонтальних консолей з кріпленням несучого тросу у спеціальному поворотному затискачі. Окремі вузли та деталі КМ-200-25 можуть успішно використовуватись при реконструкції ділянок залізниць зі швидкостями руху до 160 км/год.

УДК 621.332.3

В. В. БОЖКО, А. А. КРАСНОВ, С. В. ДЕМЧЕНКО (ДНДЦ УЗ)

Государственный научно-исследовательский центр железнодорожного транспорта Украины,
ул. И. Федорова, 39, г. Киев-38, 01038, Украина, тел. (044) 465-38-10, эл. почта: bozhko_vv@mail.ru,
ORCID: orcid.org/0000-0002-3963-8461

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ 160–200 КМ/Ч ДЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ УКРАИНЫ

В статье рассмотрены особенности конструкции контактной сети переменного тока для скоростей движения 160–200 км/ч для железных дорог Украины. Значительная часть электрифицированных железных дорог Украины требует обновления контактной сети. В ДНДЦ УЗ разработан проект контактной сети переменного тока для скоростного движения (КМ-200-25). В результате проведенных исследований определены ее основные технические характеристики и проектные параметры. При этом использовались зарубежные нормативные документы, мировой опыт проектирования и эксплуатации аналогичных контактных сетей. Главные конструктивные отличия КМ-200-25 от традиционных подвесок — повышенное натяжение несущего троса и контактного провода, использование мерных токопроводящих струн, регулируемых по длине, компенсированная раздельная анкерировка. Разработана конструкция изолированных горизонтальных консолей с креплением несущего троса в специальном поворотном зажиме. Отдельные узлы и детали КМ-200-25 могут успешно использоваться при реконструкции участков железных дорог со скоростями движения до 160 км/ч.

Ключевые слова: скоростное движение; контактная сеть; консоль; анкерный участок; несущий трос; контактный провод.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 621.332.3

V. V. BOZHKO, A. A. KRASNOV, S. V. DEMCHENKO (DNDTS UZ)

State Railway Transport Research Center of Ukraine, I. Fedorova str., 39, Kiev, 01038, Ukraine,
tel. (044) 465-38-10, e-mail: bozhko_vv@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-3963-8461

CONSTRUCTION FEATURES OF AC CONTACT NETWORK FOR DRIVING SPEEDS 160-200 KM/H FOR THE RAILWAYS IN UKRAINE

This article describes construction features of AC contact network for driving speeds 160-200 km/h for the railways in Ukraine in the article. The significant part of the electrified railways in Ukraine requires updating a contact network. There was developed a draft of AC contact network for high-speed driving in DNDTS UR (KM 200 25). Research results showed its main technical characteristics and design parameters. The foreign regulatory documents, international experience of design and operation for similar contact networks were used. The main structural differences between KM 200 25 and the traditional hangers are the increased tension of the suspension cable and the contact wire, the using conductive dimensional strings, which are adjustable in length and the compensated separate anchorage. The construction of isolated horizontal mounting brackets with suspension cable in a special twist clamp was developed. The individual components and spare parts KM-200-25 can be successfully used in the reconstruction of railway sections with speeds up to 160 km / h.

Keywords: high speed traffic; contact line; mounting bracket; anchor portion; suspension cable; contact wire.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

Ю. Л. БОЛЬШАКОВ (ТОВ «ГЛОРИЯ»), А. В. АНТОНОВ (ДНУЗТ)

ТОВ «Глорія», пр. Леніна, 108-а, Запоріжжя, Україна, 69004, тел. + 38 (0612) 34 80 45,
ел. пошта jurij.bolshakov@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-1513-2992

Кафедра «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010,
тел. +38 (056) 373 15 25, ел. пошта a.v.antonov91@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-5701-6087

ДІАГНОСТУВАННЯ ВУГІЛЬНИХ СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ ВСТАВОК В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Вступ

Головною задачею системи «контактна мережа – струмоприймач» є надійна передача електричної енергії від стаціонарних пристроїв тягового електропостачання до електрорухомого складу залізниць через ковзний контакт. В умовах підвищення швидкостей руху поїздів, особливо актуальною постає проблема підтримання в працездатному стані контактної мережі та струмоприймачів електрорухомого складу.

Забезпечення якісного струмознімання, в складних режимах експлуатації, пов'язане з контролем експлуатаційного стану елементів контактної мережі і струмоприймачів. При розгляді процесів, які протікають в області контакту, дуже часто нехтують впливом, що створюється одним із двох елементів контактної пари – вугільною вставкою. Її стан та процеси, що протікають в області контакту, безпосередньо впливають на міцнісні властивості проводу [1].

Вивчення механізмів руйнування вугільних струмознімальних вставок в умовах експлуатації, дозволить виявити причини пошкоджень контактного проводу. Струмознімальні елементи та контактний провід, в процесі експлуатації піддаються механічному, електричному та електромеханічному зношуванню. Механічний знос виникає в процесі тертя контактуючих поверхонь і залежить від контактного натиску [11 – 14], а електрична складова зносу з'являється при появі відривів.

Пошкодження поверхні вугільної вставки, призводить до збільшення густини струму в локальних місцях контакту і, як наслідок, до перегріву контактного проводу. В залежності від тривалості термічного впливу на контактний провід, можлива різна ступінь його локального знеміцнення. Знеміцнений шар міді буде піддаватись більш інтенсивному механічному зношуванню, таким чином, структурні зміни металу контактного проводу, викликані електричним зношуванням, підсилюють інтенсивність механічного зносу. В зв'язку з цим, про-

блема підвищення надійності контактної пари «струмознімальний елемент – контактний провід» відноситься до числа пріоритетних.

При виборі матеріалу струмознімальних елементів та контактних проводів, перш за все, виходять із міркувань доведення їх строку експлуатації до максимально можливого, при якомога менших витратах на обслуговування та ремонт. Такі вимоги до вибору матеріалу контактної пари являються досить жорсткими та суперечливими, через це, різні країни використовують ті чи інші матеріали для струмознімальних елементів.

Якщо для діагностування контактного проводу в експлуатації в останні роки повсюдно впроваджуються методи неруйнуючого контролю, то для вугільних вставок такі роботи виконувались епізодично [6, 7]. Реалізація заходів по підвищенню надійності роботи струмознімальних вставок можлива за рахунок створення високоефективних засобів їх діагностування, що дозволяють знизити витрати на забезпечення необхідного рівня надійності.

Мета

Метою даної статті є визначення основних залежностей між діагностичними та структурними параметрами вугільних струмознімальних елементів струмоприймачів електрорухомого складу, а також розробити та обґрунтувати можливість застосування неруйнуючих методів діагностування вугільних струмознімальних вставок електрорухомого складу.

Методика

На базі локомотивних депо, обслуговуючих електрорухомий склад змінного та постійного струму, проводились експлуатаційні дослідження вставок типу А та Б, які вже були в експлуатації та нових.

Для встановлення залежності виду пошкоджень та місць їх розташування на полозі струмоприймача, проводився огляд поверхні вставок в локомотивному депо Знам'янка, Київ-Пас. та

Дніпропетровськ-Пас. Оцінці піддавались усі вставки струмоприймачів локомотивів, але без урахування пробігу та струмового навантаження.

При аналізі характеру зносу вставок, були виявлені два різних види зносу їх поверхні. Перший та третій ряди вставок трирядного полозу мають сколи різної площі. Для першого ряду – сколи в основному розташовуються ближче до передньої (по відношенню до руху локомотива) частини вставки, а для третього – до задньої. Причина появи сколів на передній, набігаючій частині вставки першого ряду полягає в ударному впливі на це місце вставки контактної провodu [2]. Відколи на збігаючій частині вставки третього ряду в основному викликані іскровим і дуговим впливом (рис. 1). Вставки другого ряду мають найменше бічних сколів, поверхня на більшій частині вставок шліфувана проводом.



Рис. 1. Види зношування вставок полозів струмоприймачів: а) сколи вставок першого ряду; б, в) електро-дуговий вплив на вставки третього ряду; г) підпали підшви вставок

При дослідженні вставок, що були в експлуатації різний час, на їх поверхні поряд з ознаками зносу від тертя (різного характеру) виявлені локальні лунки з краями неправильної форми та діаметром від 1 до 12 мм. Причиною появи цього виду зносу можуть бути удари, які з'являються при русі та порушення контакту, що супроводжуються іскрінням та появою електричної дуги. Відомий досвід розробки вставок з трапецеїдальною формою профілю [8, 9]. Профіль вставки [8], виконаний з кутом нахилу $30...60^\circ$ прямолінійної ділянки до основи, а профіль вставки [9] має криволінійну форму контактуючої поверхні, що описується віткою параболі. Такі профілі дозволяють знизити динамічні удари на бокову поверхню вставки, але не вирішують проблему аеродинамічних властивостей полоза струмоприймача в цілому.

Авторами [2], запропонована вставка з профілем випуклої форми, яка показала кращий результат під час дослідних випробувань, в порівнянні зі вставками з трапецеїдальним та стандартним профілем. Випукла форма профілю вставки, позитивно впливає на аеродинамічні властивості полозу струмоприймача, при цьому, вага полозу зменшується на $6...11\%$.

Окремо необхідно відзначити наявність на нижній частині цілого ряду вставок ерозійних лунок невеликої глибини і слідів оксидів заліза. Причиною появи ерозії в цьому місці являється поганий контакт вставки і корпусу полоза струмоприймача [3].

Як зазначалося, електро-дуговий вплив на вставку призводить не тільки до її власного руйнування, але й впливає на знеміцнення контактної провodu з можливою пластичною деформацією, що може викликати обрив останнього під дією робочого натягу [1].

Досягти зменшення електричного та механічного зносу вугільних вставок, можливо, розробивши та впровадивши систему діагностування вугільних вставок в експлуатації, що безпосередньо є ефективним та економічно-доцільним підходом при вирішенні вказаних вище проблем. Впровадження такої системи дозволить збільшити міжремонтний пробіг полозів струмоприймачів та збільшити строк служби вставок, контактної провodu.

Аналіз пошкоджуваності елементів та конструкцій об'єктів струмознімання електрифікованих залізниць, а також застосування різноманітних матеріалів в пристроях контактної мережі та струмоприймачах електрорухомого складу, способів виробництва та обробки, методів оцінки якості та придатності для конкретних випадків

практичного застосування – все це визначає загальну необхідність в комплексному вивченні властивостей матеріалів та виробів і їх поведінку при різноманітних навантаженнях, близьких до умов експлуатації. У відповідності до існуючих вимог, під час виробництва та вхідного контролю, частина вставок з кожної нової партії проходить нормовані дослідження [3], які, за умови комплексного аналізу, можуть дати уявлення про якість кожного конкретного розглядуваного зразка. Але застосування подібних методів для вхідного контролю в депо різко обмежена, внаслідок вимогливості їх до точного і, відповідно, дорогого вимірювального обладнання. Також, як недолік, можна відзначити значний час, необхідний для проведення всіх досліджень зазначеними методами.

Відповідно до цього, постає важливе питання вибору та застосування економічно-доцільного методу неруйнуючого контролю, як нових, так і експлуатованих струмозмінювальних елементів.

У відповідності до загальноприйнятої класифікації, всі методи неруйнівного контролю поділяють на дев'ять різних видів: магнітний, електричний, вихреструмний, радіохвильовий, тепловий, оптичний, радіаційний, акустичний та проникаючими речовинами.

В практиці експлуатації використовується метод непрямих вимірів, відповідно до якого, обирається вихідний параметр, який є найзручнішим для виміру та зв'язаний певною залежністю з необхідним структурним параметром. Знаючи взаємозв'язок вихідного та структурного параметрів, можна визначити технічний стан об'єкту. Вихідні параметри, що використовуються для оцінки технічного стану об'єкту, прийнято називати діагностичними. При проведенні оцінки технічного стану об'єктів може використовуватись велика кількість діагностичних параметрів, їх можна прокласифікувати наступним чином, приведеним на рис. 2.



Рис. 2. Класифікація діагностичних параметрів

Зв'язок між структурними та діагностичними параметрами може бути як однофакторним, так і багатфакторним. Останній представляє собою зміну одного чи декількох діагностичних параметрів, що відповідають зміні одного чи декількох структурних параметрів.

Найбільш часто використовуваними неруйнуючими методами контролю внутрішньої структури матеріалу є: рентгенографія і ультразвукові дослідження [3]. Ці методи частково перекривають області застосування один одного і частково розширюють їх.

Відомий досвід використання ультразвукових методів дослідження для визначення стану струмозмінювальних елементів та експлуатаційного контролю за ними [7]. Зв'язок між власти-

востями матеріалу вставки та характером акустичного сигналу був встановлений експериментальним шляхом, на основі чого розроблена методика відбраковування та сортування вставок за якістю виготовлення методом ультразвукового зондування, блок-схема методики приводиться нижче (рис. 3).

Для адекватності методу, він був додатково проконтрольований вимірами електропровідності вставок.

Значна складність при роботі з пристроями ультразвукового контролю, висока вартість та низькі показники надійності результатів вимірювання унеможливають використання подібних систем для контролю якості виготовлення вугільних вставок в умовах депо [3].

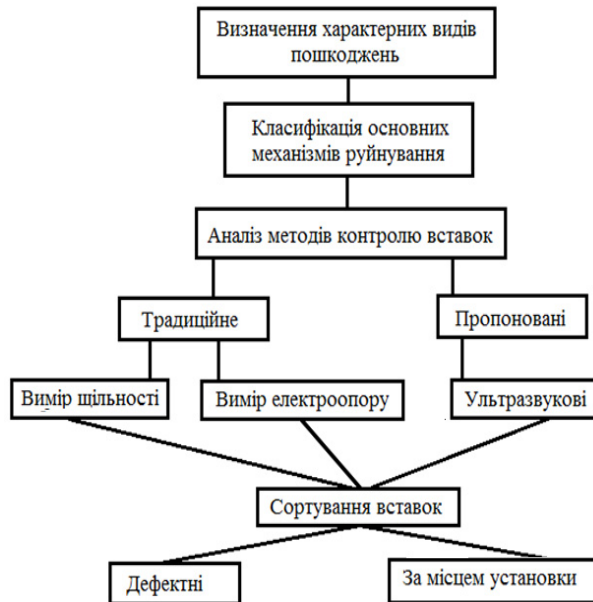


Рис. 3. Блок-схема методики дослідження вугільних вставок

Метод вихрових струмів, поряд з ультразвуковими і рентгеноскопічними дослідженнями, є одним з основних неруйнівних методів контролю та діагностики дефектів в різних матеріалах і виробках. Інформативним параметром в цьому методі є напруга у вимірювальній обмотці первинного датчика-перетворювача. Її величина залежить від складу і структури матеріалу, виду і параметрів дефектів його будови, частоти змінного електромагнітного поля, що збуджує вихрові струми, а також від технологічних факторів – конструкції і параметрів датчика, величини зазору між датчиком і поверхнею матеріалу. В силу цього, залежно від конкретних умов діагностування та контролю доводиться змінювати конструкцію і технологічні характеристики датчика. Такі зміни покликані забезпечити високу чутливість виявлення тих чи інших видів дефектів в конкретному матеріалі.

В силу складності обслуговування та роботи з системою, її вартістю, метод вихреструмовеого контролю являється недоцільним для вирішення поставлених цілей діагностування вугільних вставок. Найбільш ефективним є використання стенду для виміру питомого електричного опору вугільних струмоznімальних вставок методом амперметра-мілівольтметра, розробленого на мікропроцесорній базі, який дозволить оцінити величину питомого електричного опору струмоznімальних вставок, їх загальний фізичний стан, а також відсортувати за місцем встановлення. Визначення питомого електричного опору на струмоznімальній частині вставки проводиться у відповідності до ГОСТ – 23776-79. Потенціальні проводи мають загострені

штирі на кінцях довжиною 30 мм, а відстань між ними становить 150 мм, розташовуються на рівній відстані від торців вугільної вставки. Струмові затискачі фіксують вставку з обох сторін, стенд розрахований на струм до 30 А, а його структурна схема приводиться на рис. 4.

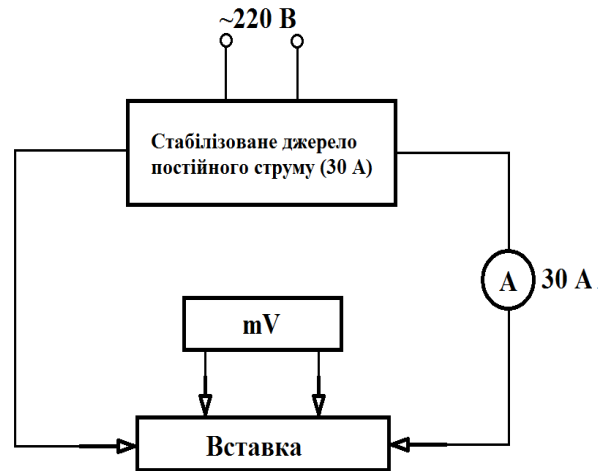


Рис. 4. Структурна схема стенду для діагностування вставок

Сутність методу виміру питомого електричного опору вугільних вставок полягає в пропусканні через них постійного стабілізованого струму, з вимірюванням падіння напруги на контактній поверхні вставки, площа поперечного перерізу якої відома, за формулою, що витікає з закону Ома:

$$\rho = \frac{\Delta U \cdot S}{I \cdot l} \quad (1)$$

де ΔU – падіння напруги між штирями, розміщеними на відстані l один від одного, мВ; l – відстань між штирями потенціальних проводів, мм; S – площа поперечного перерізу вставки, мм²; I – струм підведений до торців вставок, А.

У відповідності до теорії технічної діагностики, для якісної оцінки технічного стану об'єкту, необхідно знати початкове та гранично-допустиме значення діагностичного параметру – питомого електричного опору вугільної вставки, максимально допустиме значення якого нормується діючим нормативним документом [4] і становить 30 мкОм·м.

На теренах України та країн СНД вставки типу А та Б виготовляються з питомим електричним опором не більшим 30 та 15 мкОм·м відповідно (розрахункове значення для яких приймається 28,5 та 13,5 мкОм·м). Не зважаючи на це, питомий електричний опір вугільних вставок з однієї партії може кардинально відрізнятися.

В ході проведення експлуатаційних досліджень на базі локомотивних депо, зібрано статистичні дані про пошкодження полозів струмоприймачів, проведені дослідження вугільних вставок та встановлено, що значна частина пошкоджень тісно пов'язана з якістю вставок [3].

На стенді для визначення питомого електричного опору вугільних вставок було проведено дослідження нових та експлуатованих вугільних вставок типу А, отримані залежності приведені на рис. 5 та 6. Рівняння регресії для трьох наборів значень деяких вугільних вставок отримані і приведені на рис.5, вони являються адекватними та можуть з 95 % вірогідністю передбачати експериментальні результати. Значення коефіцієнтів детермінації для трьох побудованих кривих показують наявність позитивної кореляційної залежності між діагностичними та структурними параметрами і, відповідно, це вказує на ефективність моделі процесу.

ρ , мкОм · м

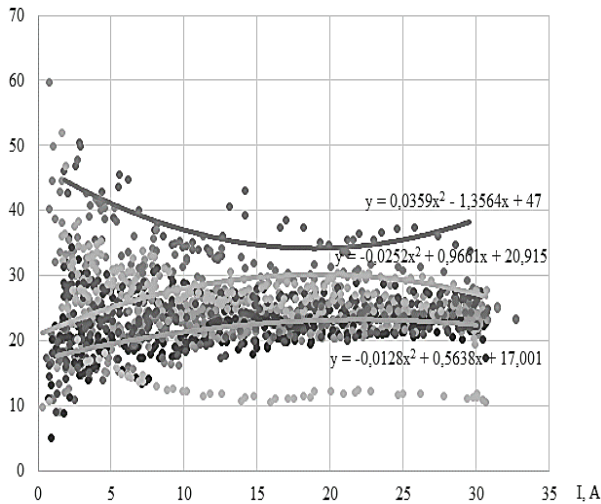


Рис. 5. Розкид значень питомого електричного опору бувших в експлуатації вугільних вставок

Для кожної окремої вставки визначався поперечний переріз із урахуванням його складної форми.

На рис. 7 приведена залежність температури нових вугільних струмознімальних вставок від величини струму. Для її визначення, в вугільну вставку на глибину 15 мм був поміщений датчик температури, витримка часу між контрольними точками складала 10 хв. Паралельно проводився вимір параметрів для розрахунку значення питомого електричного опору.

ΔU , мВ

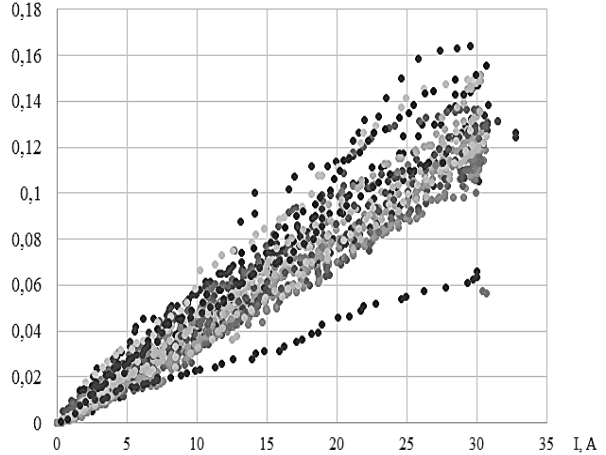


Рис. 6. Розкид значень падіння напруги на бувших в експлуатації вугільних вставках

В результаті дослідження встановлено, що питомий електричний опір вугільної вставки не змінюється при збільшенні температури, що узгоджується з відомим твердженням про високу термічну стійкість та низький коефіцієнт температурного розширення вугільних матеріалів, який є від'ємним до температури 700 К.

T, °C

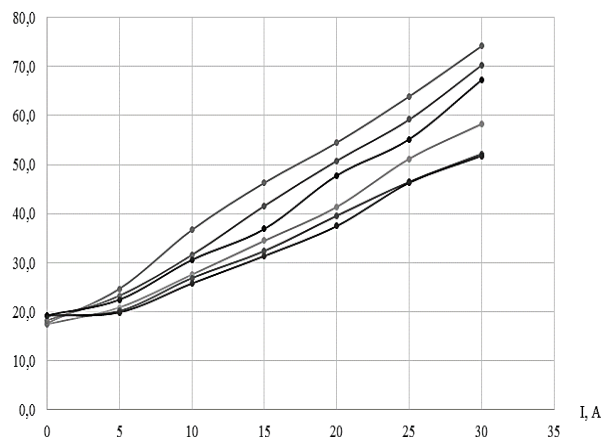


Рис. 7. Залежність температури вугільної вставки від величини струму, що протікає через неї

Зіставивши результати проведених стендових досліджень з результатами отриманими під час оцінки полозів струмоприймачів в локомотивних депо розроблені рекомендації про необхідність розділення струмознімальних елементів по групах за питомим електричним опором та використання спеціальної схеми монтажу вставок при експлуатації полозу.

Відомо, що існує залежність твердості та питомого електричного опору вставок [5], яка полягає в наступному: чим більша твердість вугільних струмознімальних елементів, тим нижча їх електропровідність (більше значення питомого електричного опору) – відповідно

більше значення електричної складової зносу та менше механічної.

У відповідності до приведеного вище, пропонується встановлювати вставки з більшим питомим електричним опором на перший ряд полозу струмоприймача, а з меншим на останній. Це дозволить зменшити кількість сколів на набігаючій частині вставок першого ряду та зменшити вплив від появи електричної дуги на вставках третього ряду.

Для підтвердження адекватності запропонованої пропозиції необхідно провести додаткові випробування для комплексу вугільних вставок типу А та Б на твердість струмознімальної частини та випробування екіпрованого полозу на кільцевому стенді лабораторії струмознімання.

Наукова новизна та практична значимість

На основі отриманих результатів експлуатаційних досліджень полозів струмоприймачів електрорухомого складу в умовах локомотивних депо постійного та змінного струму, встановлені місця та причини появи пошкоджень вугільних струмознімальних вставок, в залежності від місця розташування на полозі струмоприймача. В ході стендових досліджень встановлені залежності між діагностичними та структурними параметрами вугільних струмознімальних вставок. Керуючись отриманими результатами в експлуатаційних та лабораторних умовах запропонована схема розміщення вугільних струмознімальних елементів на полозах струмоприймачів.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Берент, В. Я. Исследование прочностных и структурных изменений эксплуатируемых контактных проводов / В. Я. Берент, А. А. Порцелан // Труды ЦНИИ МПС. – М., 1968. – Вып. 337. – С. 69 – 76.
2. Большаков, Ю.Л. К вопросу выбора рациональной формы профиля контактных вставок токоприемников электроподвижного состава / Ю.Л. Большаков, И.С. Гершман, В. Г. Сыченко // Заліз. трансп. України. – 2007. – № 3. – С. 53 – 54.
3. Большаков, Ю. Л. Підвищення ресурсу вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів швидкісного електрорухомого складу в умовах експлуатації / Ю. Л. Большаков, А. В. Антонов // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. Нац. ун-ту заліз. трансп. – 2015. – № 4. – С.
4. ГОСТ 32680 – 2014 Токосъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. – М. Изд-во Стандартиформ, 2015. – 14 с.
5. Купцов, Ю. Е. Беседы о токосъеме и его надежности, экономичности и о путях совершенствования / Ю. Е. Купцов. – М: «Модерн – А», 2001. – 256 с.

Застосування в експлуатації високоефективних засобів діагностування вугільних вставок електрорухомого складу та використання запропонованої схеми розподілення вугільних струмознімальних елементів на полозі струмоприймача в процесі його екіпівки, яка розроблена базуючись на отриманих результатах експлуатаційних та стендових досліджень вугільних вставок, дозволить зменшити електричну та механічну складову зносу контактного проводу та вугільних вставок і тим самим підвищити ефективність їх використання.

Висновки

1. Досягти найбільшої економічності струмознімання, при забезпеченні необхідного рівня надійності, можливо, при досягненні особливо високої довговічності контактного проводу та при забезпеченні необхідної довговічності вугільних вставок.
2. Встановлений характер пошкодження вугільних струмознімальних вставок в залежності від місця їх встановлення на полозі струмоприймача, встановлені залежності між діагностичними та структурними параметрами струмознімальних елементів.
3. Використання в експлуатації високоефективних засобів для діагностування вугільних струмознімальних вставок електрорухомого складу дозволить підвищити ефективність їх використання, зменшити вплив електричної та механічної складової зносу.

REFERENCES

1. Berent, V. Ya. Issledovanie prochnostnykh i strukturnykh izmenenii ekspluatiruemykh kontaktnykh provodov / V. Ya. Berent, A. A. Portselan // Trudy TsNII MPS. – M., 1968. – Vyp. 337. – S. 69 – 76.
2. Bolshakov, Yu.L. K voprosu vybora ratsionalnoy formy profilya kontaktnykh vstavok tokopriemnikov elektropodvizhnogo sostava / Yu.L. Bolshakov, I.S. Gershman, V. G. Sychenko // Zalizn. transp. Ukraini. – 2007. – № 3. – S. 53 – 54.
3. Bolshakov, Yu. L. Pidvyshchennia resursu vuhilnykh strumoznimalnykh vstavok strumopryimachiv shvydkisnoho elektrorukhomoho skladu v umovakh ekspluatatsii / Yu. L. Bolsha-kov, A. V. Antonov // Nauka ta prohres transp. Visn. Dnipropetr. Nats. un-tu zalizn. tra-nsp. – 2015. – № 5. – S.
4. ГОСТ 32680 – 2014 Tokosemnye elementy kontaktnye tokopriemnikov elektropodvizhnogo sostava. – M. Izd-vo Standartinform, 2015. – 14 s.
5. Kuptsov, Yu. Ye. Besedy o tokoseme i ego nadezhnosti, ekonomichnosti i o putyakh sovershenstvovaniya / Yu. Ye. Kuptsov. – M: «Modern – A», 2001. – 256 s.

6. Ли, В. Н. О механизмах разрушения угольных вставок токоприемников / В. Н. Ли, С. Н. Химухин // Мир Транспорта. – 2005. – № 3. – С. 80 – 82.
7. Ли, В. Н. Разработка методов контроля угольных вставок токоприемников / В. Н. Ли, П. В. Костюк, С. Н. Химухин // Контроль. Диагностика. 2006 г. – № 6 (96) – С. 20 – 23.
8. Пат. 2229395 Российская Федерация, МПК7 B60L5/08. Токосъемный элемент электрического транспортного средства / М.Н. Самодурова, Л.А. Барков. – № 2002135796/282002135795/26; заявл. 25.10.2002; опубл. 27.05.2004, Бюл. № 15 - 2 с.
9. Пат. 2168422 Российская Федерация, МПК7 B60L5/08. Токосъемный элемент токоприемника электрического транспортного средства / С.М. Жуковин, Е.И. Власов. – № 2229395; заявл. 30.12.2002; опубл. 27.05.2004, Бюл. № 16. - 3 с.
10. Поляков, В. В. Моделирование пластической деформации и разрушения пористых материалов / В. В. Поляков, А. В. Егоров, А.А. Лепендин // Письма в Журнал технической физики. – 2005. – Т. 31. – Вып. 4. – С. 17 – 22.
11. Яндович, В.Н. Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: организация належного токосяема / В.Н. Яндович, В.Г. Сыченко, А.В. Антонов // Електрифікація транспорту. - 2014. - №7. - С. 67-77.
12. Auditeau, G. Carbon of high destiny for current collection / G. Auditeau // Revue Generale des Chemins de Fer. – 2010. – № 200. – P. 9–19.
13. Auditeau, G. Wearout current collection contact / G. Auditeau // Elektrische Bahnen. – 2013. – № 3. – P. 186–194.
14. Lee, J. H. Development and Verification of a Dynamic Analysis Model for the Current-Collection Performance of High-Speed Trains Using the Absolute Nodal Coordinate Formulation / J. H. Lee, T. W. Park // Trans. Of the KSME. 2012. – № 36(3), P. 339-346.
6. Li, V. N. O mekhanizmaxh razrusheniya ugolnykh vstavok tokopriemnikov / V. N. Li, S. N. Khimukhin // Mir Transporta. – 2005. – № 3. – S. 80 – 82.
7. Li, V. N. Razrabotka metodov kontrolya ugolnykh vstavok tokopriemnikov / V. N. Li, P. V. Kostyuk, S. N. Khimukhin // Kontrol. Diagnostika. 2006 g. – № 6 (96) – S. 20 – 23.
8. Pat. 2229395 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 B60L5/08. Tokosemnyy element elektri-cheskogo transportnogo sredstva / M.N. Samodurova, L.A. Bar-kov. – № 2002135796/282002135795/26; yayavl. 25.10.2002; opubl. 27.05.2004, Byul. № 15 - 2 s.
9. Pat. 2168422 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 B60L5/08. Tokosemnyy element tokopri-emnika el-ektricheskogo transportnogo sredstva / S.M. Zhukovin, Ye.I. Vlasov. – № 2229395; yayavl. 30.12.2002; opubl. 27.05.2004, Byul. № 16. - 3 s.
10. Polyakov, V. V. Modelirovanie plasticheskoy de-formatsii i razrusheniya poristyykh ma-terialov / V. V. Polyakov, A. V. Yegorov, A.A. Lependin // Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2005. – T. 31. – Vyp. 4. – S. 17 – 22.
11. Yandovich, V.N. Sravnitelnyy analiz kon-taktnykh podvesok v stranakh Yevrosoyuza i Uk-rainy: organizatsiya nalezhnogo tokosema / V.N. Yandovich, V.G. Sychenko, A.V. Antonov // Yelektrifikatsiya transportu. - 2014. - №7. - S. 67-77.
12. Auditeau, G. Carbon of high destiny for current collection / G. Auditeau // Revue Generale des Chemins de Fer. – 2010. – № 200. – P. 9–19.
13. Auditeau, G. Wearout current collection contact / G. Auditeau // Elektrische Bahnen. – 2013. – № 3. – P. 186–194.
14. Lee, J. H. Development and Verification of a Dynamic Analysis Model for the Current-Collection Performance of High-Speed Trains Using the Absolute Nodal Coordinate Formulation / J. H. Lee, T. W. Park // Trans. Of the KSME. 2012. – № 36(3), P. 339-346.

Надійшла до друку 10.06.2015.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Сасенко Ю. Л.*

Метою статті є визначення основних залежностей між діагностичними та структурними параметрами вугільних струмознімальних елементів струмоприймачів електрорухомого складу, а також розробка та обґрунтування можливості застосування неруйнуючих методів діагностування вугільних струмознімальних вставок електрорухомого складу.

Методика статті ґрунтується на використанні положень теорії діагностики, статистики, положень теорії надійності технічних систем та електромеханічних процесів.

В роботі досліджена проблема взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем електрорухомого складу залізниць, розглянуті існуючі методи неруйнуючого контролю, виділені їх переваги та недоліки, визначені найбільш ефективні та відповідні поставленій задачі методи діагностування вугільних струмознімальних елементів електрорухомого складу. Проведені експлуатаційні дослідження вугільних струмознімальних елементів на базі локомотивних депо постійного та змінного струму, встановлений характер їх пошкодження в залежності від місця встановлення. На стенді для діагностування вугільних струмознімальних елементів проведені дослідження їх стану та встановлені залежності між діагностичними та структурними параметрами.

На основі отриманих результатів експлуатаційних досліджень полозів струмоприймачів електрорухомого складу в умовах локомотивних депо постійного та змінного струму, встановлені місця та причини появи пошкоджень вугільних струмознімальних вставок, в залежності від місця розташування на полозі струмоприймача. В ході стендових досліджень встановлені залежності між діагностичними та структурними параметрами вугільних струмознімальних вставок. Керуючись отриманими результатами в експлуатаційних та лабораторних умовах запропонована схема розміщення вугільних струмознімальних елементів на полозах струмоприймачів.

Застосування в експлуатації високоефективних засобів діагностування вугільних вставок електрорухомого складу та використання запропонованої схеми розподілення вугільних струмознімальних елементів на полозі струмоприймача в процесі його екіпіровки, яка розроблена базуючись на отриманих результатах експлуатаційних та стендових досліджень вугільних вставок, дозволить зменшити електричну та механічну складову зносу контактного проводу та вугільних вставок і тим самим підвищити ефективність їх використання.

Ключові слова: струмознімальні елементи; вставки; графіт; зносостійкість; ресурс; технічне діагностування; полоз струмоприймач.

УДК 629.423.33 : 621.336.2

Ю. Л. БОЛЬШАКОВ (ООО «ГЛОРИЯ»), А. В. АНТОНОВ (ДНУЖТ)

ООО «Глория», пр. Ленина, 108-а, Запорожье, Украина, 69004, тел. +38(0612)34-80-45, эл. почта: jurij.bolshakov@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-1513-2992

Кафедра «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: +38(056)373-15-25, эл. почта: a.v.antonov91@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-5701-6087

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ УГОЛЬНЫХ ТОКОСЪЕМНЫХ ВСТАВОК В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Целью статьи является определение основных зависимостей между диагностическими и структурными параметрами угольных токосъемных элементов токоприемников электроподвижного состава, а также разработка и обоснование возможности применения неразрушающих методов диагностики угольных токосъемных вставок электроподвижного состава.

Методика статьи основывается на использовании положений теории диагностики, статистики, положений теории надежности технических систем и электромеханических процессов.

В работе исследована проблема взаимодействия контактной подвески с токоприемником электроподвижного состава железных дорог, рассмотрены существующие методы неразрушающего контроля, выделены их преимущества и недостатки, определены наиболее эффективные и соответствующие поставленной задаче методы диагностирования угольных токосъемных элементов электроподвижного состава. Проведенные эксплуатационные исследования угольных токосъемных элементов на базе локомотивных депо постоянного и переменного тока, установлен характер их повреждения в зависимости от места установки. На стенде для диагностирования угольных токосъемных элементов проведены исследования их состояния и установлены зависимости между диагностическими и структурными параметрами.

На основе полученных результатов эксплуатационных исследований полозов токоприемников электроподвижного состава в условиях локомотивных депо постоянного и переменного тока, установленные места и причины появления повреждений угольных токосъемных вставок, в зависимости от местоположения на полозе токоприемника. В ходе стендовых исследований установлены зависимости между диагностическими и структурными параметрами угольных токосъемных вставок. Руководствуясь полученными результатами в эксплуатационных и лабораторных условиях, предложенная схема размещения угольных токосъемных элементов на полозах токоприемников.

Применение в эксплуатации высокоэффективных средств диагностирования угольных вставок электроподвижного состава и использования предложенной схемы распределения угольных токосъемных элементов на полозе токоприемника в процессе его экипировки, которая разработана основываясь на полученных результатах эксплуатационных и стендовых исследований угольных вставок, позволит уменьшить электрическую и механическую составляющую износа контактнго проводу и угольных вставок и тем самым повысить эффективность их использования.

Ключевые слова: токосъемные элементы; вставки; графит; износостойкость; ресурс; техническое диагностирование; токоприемник

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

UDC 629.423.33 : 621.336.2

Y. L. BOLSHAKOV (GLORIYA LLC), A. V. ANTONOV (DNURT)

GLORIYA LLC, Lenin Av., 108-a, Zaporizhzhia, Ukraine, 69004, tel.: +38 (0612)34-80-45,
e-mail: juri.bolshakov@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-1513-2992

Department «Power Supply of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after
Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38(056)373-15-25,
e-mail: a.v.antonov91@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-5701-6087

DIAGNOSTIC OF CURRENT COLLECTOR ELEMENTS IN EXPLOITATION

The aim of the article is to define the relationships between the major diagnostic and structural parameters of coal-fired current collector pantographs of electric rolling elements, and the development and study the possibility of using non-invasive methods of diagnosis coal inserts current collecting electric rolling stock.

Methodology of article based on the use the theory of diagnostics, statistics, the theory of reliability of technical systems and electromechanical processes.

We have studied problem of interaction with the overhead catenary pantograph electric rolling stock of railways, discussed the existing methods of nondestructive testing, highlight them advantages and disadvantages, identified the most effective methods of diagnosing current collecting elements of electric rolling stock. Carried out operational research based on the current collecting elements of locomotive depot of AC and DC, established the character of damage depending on the installation location. On the stand for diagnosing carbon current collecting elements investigated their condition and established dependencies between diagnostic and structural parameters.

Based on the results operational research pantographs of electric rolling stock in a locomotive depot AC and DC, established the place and cause of the damage to carbon inserts current collector, depending on the location on pantograph. The studies established dependence between diagnostic and structural parameters of carbon current collector inserts. Being guided by the results obtained in the laboratory and operational conditions, the proposed the scheme of distribution the elements carbon current collector pantographs.

The use in operation highly effective means of diagnosing carbon inserts electric rolling stock and the use of the proposed scheme of distribution of elements on the current collector carbon pantograph in the process of equipment, which is developed based on the results research carbon inserts would reduce electrical and mechanical constituent wear and tear of contact wires and carbon inserts and thereby increase the effectiveness of their use.

Keywords: current collector elements; inserts; graphite; wear resistance; resources; technical diagnostics; pantograph.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*

С. П. ДЕНИСЮК, В. П. ОПРИШКО (НТУУ «КПІ»)

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 03056, Київ, вул. Борщагівська 115, тел.: (093) 750-13-90, ел. пошта: spdens@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680

ІНТЕГРАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ПРОЦЕС ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В СЕКТОРІ ТРАНСПОРТУ

Вступ

У світовому масштабі в 2011 році на транспортний сектор припадало 27 % загального кінцевого споживання енергії. Причому проблеми об'єктивної оцінки ускладнює той факт, що в енергетичних балансах України енергоспоживання наводиться тільки для сектора в цілому і склало 16 %, без поділу між пасажирським та вантажним транспортом. Без належної статистики по споживанню і виробництву енергії на місцевому і загальнонаціональному рівнях і по секторах економіки Україна ніколи не зможе повністю усвідомити масштаб проблеми і потенціал економії [1,2].

Енергетична ефективність є на сьогоднішній день одним із пріоритетів ЄС. Про це свідчать численні законодавчі документи Співтовариства. Для держав-членів встановлюють стратегічні орієнтації за якими зазвичай слідує програми спільних дій і які іноді супроводжуються зобов'язаннями для держав-членів щодо досягнення певних цілей і способів дій, які потрібно використовувати [3,4].

Міжнародна Енергетична Агенція (ІЕА) розробила методiku для аналізу тенденцій енергоспоживання де представлений огляд основних рекомендаційних методів аналізу і пов'язаних з ними перевагами та обмеженнями для секторів кінцевого споживання – житлового, сектору послуг, промисловості а також для сектору пасажирського та вантажного транспорту [5].

Методика ІЕА

Першим необхідним кроком ІЕА визначила розробку значимих показників, щоб дати розбивку загального енергоспоживання транспорту між пасажирським та вантажним. ІЕА робить спроби повторної перевірки узгодженості транспортних даних, порівнюючи дані отримані методом «зверху-вниз» (за допомогою анкет про енергоспоживання) з отриманими «знизу-вгору» (виходячи з даних про кількість транспортних засобів, пробігу та економічності).

Усі показники, що представлені на рис. 1, не будучи показниками енергетичної ефективності, за відсутності більш дезагрегованих показників, все ж таки можуть надати корисну загальну інформа-

цію про енергоспоживання у транспортному секторі. Найбільш агрегований рівень 1 відноситься до загального споживання енергії транспортним сектором, виражений або в абсолютних величинах, або у відсотках від загального кінцевого енергоспоживання «Т1а», а також до частки кожного джерела енергії в загальній структурі енергоспоживання транспортного сектору «Т1б». Оскільки транспорт є кінцевим споживачем, впливаючим на споживання енергетичних ресурсів, третій агрегований показник позначає споживання енергетичних ресурсів транспортом в абсолютних величинах або як частку в загальному кінцевому споживанні енергетичного ресурсу.

На проміжному рівні 2 піраміди знаходяться два енергетичних показника: частка кожного підсектору в загальному енергоспоживанні транспортом «Т2а» та частка кожного сегменту в загальному енергоспоживанні транспорту «Т2б» Данні для показника «Т2а», такі як енергоспоживання автомобільного, залізничного, повітряного чи водних транспортних засобів, зазвичай представлені на рівні національних енергетичних балансів, тоді як данні для показника «Т2б», такі як споживання пасажирського чи вантажного транспорту, зазвичай відсутні.

Третій рівень відноситься до двох типів енергетичних показників. Частки двох сегментів в загальному енергоспоживанні кожного підсектору виражає показник «Т3а». Наприклад він може виражати частку пасажирського транспорту в енергоспоживанні залізничного транспорту, тоді як «Т3б» виражає частки чотирьох підсекторів в загальному енергоспоживанні кожного сегменту. Зокрема, він може виражати частку залізничного транспорту в енергоспоживанні автомобільного транспорту.

У сегменті залізничного транспорту виділяють пасажирські та вантажні перевезення. Пасажирський залізничний транспорт – включає будь-які пасажирські перевезення по залізничним дорогам, зокрема регіональний, міській, приміській, в рамках державних кордонів. Аналогічним чином визначаються перевезення вантажним залізничним транспортом.

© Денисюк С. П., Опришко В. П., 2015

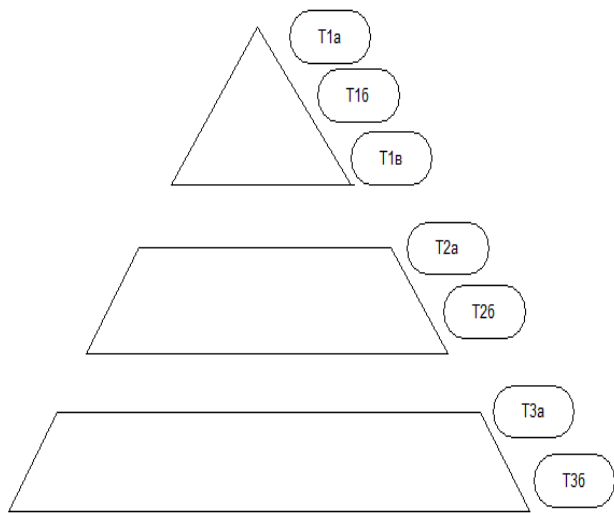


Рис. 1. Піраміда показників транспортного сектору

Аналіз сегменту пасажирського залізничного транспорту

Тенденції в енергоспоживанні пасажирського залізничного транспорту обумовлені змінами в кількості та щільності населення, картині землекористування, транспортної інфраструктурі, характері поїздок, доходів, забезпеченості особистими автомобілями, заповнюваності потягів, перевагах споживачів і паливної економічності. У більш загальному плані, для розробки показників енергоефективності пасажирського залізничного транспорту основними змінними діяльності, розглянутими для пояснення тенденцій в енергоспоживанні, є пасажиро-кілометри (пкм) і машино-кілометри (мкм).

На рівні пасажирського залізничного транспорту (див рис.2) в цілому складова діяльності відображає зростання загальної кількості пкм, тоді як структурна складова відображає відносну зміну в частках видів транспорту в цих пкм. Результовуюча енергоємність включає вплив змін енергоємності всіх видів залізничного транспорту.

Показник верхнього рівня «ТП1а» являється загальним енергоспоживанням пасажирського залізничного транспорту, вираженим або в абсолютних величинах, або у відсотках від загального енергоспоживання залізничного сектору. Хоча це і не є показником енергоефективності, цей енергетичний показник дає ключ до розуміння абсолютної та відносної значущості пасажирського транспорту в загальному енергоспоживанні залізничного транспорту. Він може використовуватись, наприклад, для оцінки ступеня привабливості пасажирського залізничного транспорту з точки зору можливості економії енергії.

Другим показником рівня 1 (ТП1б) є частка кожного джерела енергії в загальній структурі

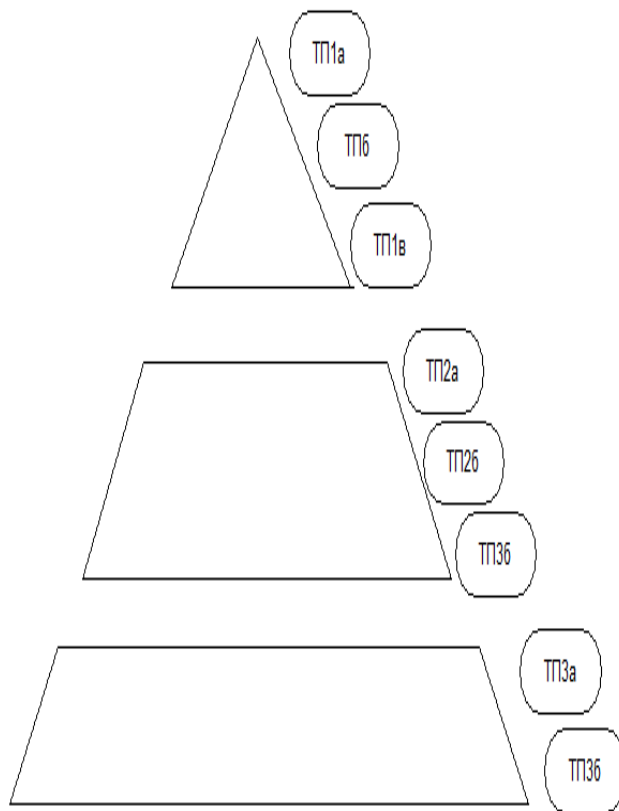
- Загальне енергоспоживання транспорту (абсолютні величини або частка в ЗКЕН)
- Частка кожного джерела енергії в загальній структурі енергоспоживання транспорту
- Споживання енергетичних ресурсів транспортом
- Частка кожного підсектору в загальному енергоспоживанні транспорту
- Частка кожного сегменту в загальному енергоспоживанні транспорту
- Частка кожного підсектору, частка кожного сегменту в енергоспоживанні підсектора
- Частка кожного сегменту, частка кожного підсектора в енергоспоживанні сегменту

енергоспоживання пасажирського залізничного транспорту. Хоча він не є показником енергоємності, він представляє відносне значення різних енергоресурсів у структурі енергоспоживання пасажирського залізничного транспорту. Третій показник показує споживання енергоресурсів пасажирським транспортом або у відносних величинах, або як частку в загальному кінцевому споживанні.

На другому рівні пропонуються три показники енергоємності: енергоспоживання пасажирського залізничного транспорту на ВВП/душу населення «ТП2а», на величину мкм «ТП2б» та на величину пкм «ТП2в». Показник ТП2а корисний при оцінці тенденцій зміни у часі чи для порівняння окремих країн між собою. Тенденції енергоспоживання в розрахунку на ВВП/душу населення, при відсутності кращих даних, часто використовуються для аналізу тенденцій енергоспоживання пасажирського залізничного транспорту. Показники «ТП2б» і «ТП2в» більш тісно пов'язані з енергоефективністю, оскільки вони представляють собою відношення енергоспоживання до даних про діяльність, хоча і на агрегованому рівні всього сегменту.

На третьому рівні піраміди пропонується для оцінки енергоспоживання використовувати мкм «ТП3а» і на пкм «ТП3б», які розраховуються для кожного підсектору чи виду транспорту/типу транспортного засобу.

Як і для пасажирського, енергоспоживання вантажного залізничного транспорту в явному вигляді в енергетичних балансах відсутнє [6]. Тому необхідним кроком є дезагрегація енергоспоживання за різними сегментами вантажного залізничного транспорту. У даний час дуже мало інформації збирається по сектору вантажного транспорту в цілому, а також є багато перешкод щодо кількісної оцінки діяльності в цьому секторі.



- Загальне енергоспоживання пасажирського залізничного транспорту (абсолютні величини або частка в ЗКЕН)
- Частка кожного джерела енергії в загальній структурі енергоспоживання пасажирського залізничного транспорту
- Споживання енергетичних ресурсів пасажирським залізничним транспортом
- Енергоспоживання пасажирського залізничного транспорту по відношенню до ВВП на душу населення
- Енергоспоживання пасажирського залізничного транспорту на мкм
- Енергоспоживання пасажирського залізничного транспорту на пкм
- Частка кожного виду пасажирського залізничного транспортного засобу: енергоспоживання на мкм
- Частка кожного виду пасажирського залізничного транспортного засобу: енергоспоживання на пкм

Рис. 2. Піраміда показників для пасажирського залізничного транспорту

Аналіз сегменту вантажного залізничного транспорту

Тенденції в енергоспоживанні вантажного залізничного транспорту обумовлюються змінами в загальних обсягах вантажних перевезень, що залежать від економічної діяльності, пов'язаної з пересуванням матеріалів, проміжних продуктів і готових споживчих товарів. Існує сильна кореляція між зростанням обсягів вантажних перевезень і зростанням ВВП (хоча може спостерігатися й зменшення кореляції при структурних змінах в промисловості, наприклад, при переході від сировинних товарів до споживчих товарів з високою доданою вартістю).

Піраміда для вантажного залізничного транспорту, подібна піраміді для пасажирського (див рис.3). На першому рівні показник «ТВ1а» є загальним енергоспоживанням вантажного залізничного транспорту, вираженим або в абсолютних величинах, або у відсотках від загального споживання залізничного сектору. Хоча він не є показником енергоефективності, він дає базову оцінку абсолютної і відносної значущості вантажного залізничного транспорту в загальному енергоспоживанні залізничного транспорту. Він може використовуватись для

оцінки ступеню привабливості вантажного залізничного транспорту з точки зору можливої економії енергії.

Другим показником рівня 1 «ТВ1б» є частка кожного джерела енергії в загальній структурі енергоспоживання вантажного залізничного транспорту. Третій показник рівня 1 «ТВ1в» відноситься до споживання енергетичних ресурсів вантажним залізничним транспортом, вираженим або в абсолютних величинах, або як частка в загальному кінцевому споживанні енергетичних ресурсів.

На другому рівні пропонуються три показники енергоемності: енергоспоживання вантажного залізничного транспорту на одиницю ВВП «ТВ2а», на величину мкм «ТВ2б» та на величину ткм «ТВ2в». Якщо для пасажирського залізничного транспорту, показник «ТП2а» розраховувався на ВВП/душу населення, то показник «ТВ2а» розраховується на основі ВВП в плані сильної загальної кореляції обсягів перевезення сировинних матеріалів, проміжної продукції та готових товарів зі зміною в економічній активності та ВВП.

Щоб отримати більш якісний показник, доцільно розглядати лише додану вартість товарів, що перевозяться. Однак інформація такого рівня часто недоступна.

© Денисюк С. П., Опришко В. П., 2015

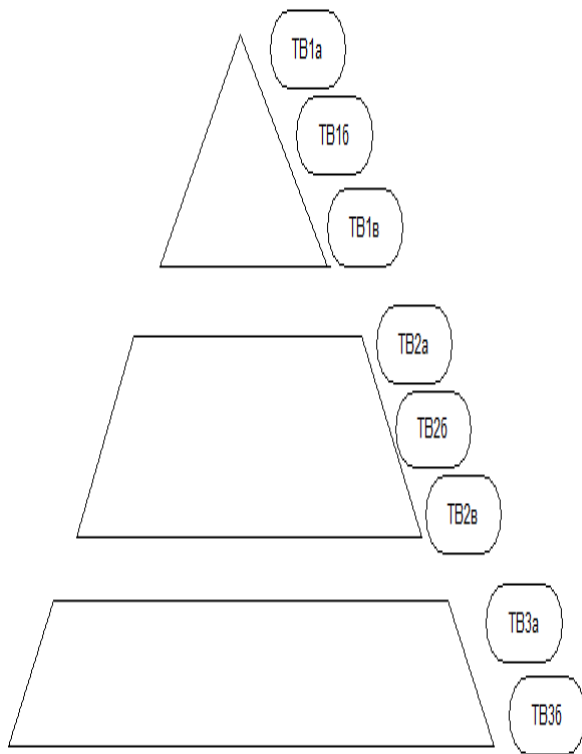


Рис. 3. Піраміда показників для вантажного залізничного транспорту

Показник ТВ3 використовується для порівняння величин з іншими країнами, проте цей показник не є мірою зміни енергоефективності, оскільки не враховує відносну значущість кожного підсектора та вплив багатьох факторів, наприклад вид товарів, що перевозяться, тощо.

Декомпозиційний аналіз

Показники енергоефективності не можуть прогнозувати зміни в загальному енергоспоживанні або дати кількісну оцінку впливу окремих складових або факторів на загальне енергоспоживання. Тому часто необхідно здійснити більш детальний аналіз, щоб зрозуміти сукупний вплив ряду різних факторів або рушійних сил на загальне енергоспоживання. Декомпозиційний аналіз використовується для розділення впливу різних чинників на загальне споживання енергії. Методика IEA для аналізу тенденцій кінцевого споживання зазвичай розрізняє три основні складові, які впливають на споживання енергії: обсяги діяльності, її структура і енергоємність. При декомпозиційному аналізі впливу кожного конкретного фактора отримується кількісна оцінка, так що фактори, пов'язані з енергетичною політикою, можуть бути відокремлені від змін у структурній і кількісній складових енергоспоживання. Енергоспоживання за секторами або ключовими видами кінцевого споживання, а також за видами палива. При можливості, щоб врахувати кліма-

- Загальне енергоспоживання вантажного залізничного транспорту (абсолютні величини або частка в ЗКЕН)
- Частка кожного джерела енергії в загальній структурі енергоспоживання вантажного залізничного транспорту
- Споживання енергетичних ресурсів вантажним залізничним транспортом
- Енергоспоживання вантажного залізничного транспорту на одиницю ВВП
- Енергоспоживання вантажного залізничного транспорту на мкм
- Енергоспоживання вантажного залізничного транспорту на ткм
- Частка кожного виду вантажного залізничного транспортного засобу: енергоспоживання на мкм
- Частка кожного виду вантажного залізничного транспортного засобу: енергоспоживання на ткм

тичні та соціальні чинники загального енергоспоживання виконується дезагрегація на географічному або регіональному рівні. Якщо є більш деталізовані данні, то аналізується вплив більшої кількості факторів на загальне енергоспоживання (таких як коефіцієнт використання потужності, погодні умови тощо). Основним питанням декомпозиції є вибір визначення діяльності. В ідеальному випадку обрана міра діяльності буде використовувати легкодоступні дані і максимально можливо відповідати заявленим цілям і завданням програмної діяльності країни, її окремої галузі або регіону, або ж організації, що виконує аналіз.

Існують різні форми одного й того ж методу в залежності від вибору базового року, типу математичної форми або конфігурації (адитивний чи мультиплікативний аналіз).

Представлений в табл. 2 метод логарифмічних середніх індексів Дівізіа, характеризується повнотою декомпозиції. Однак він не підходить в разі наявності нульових або від'ємних значень в аналізованих наборах даних.

Вибір базового року є надзвичайно важливим і допускає різновиди фіксованого або зчепленого базового року. У разі зчепленого базового року замість одного базового року використовується часовий ряд, так що для кожного року базовим вважається попередній рік. Вважається, що метод зчеплення дає більш точні результати і полегшує аналіз множинних періодів часу.

© Денисюк С. П., Опришко В. П., 2015

Вибір адитивної або мультиплікативної конфігурації переважно залежить від наявності даних і форми, в якій вимагається дати результат впливу окремих ефектів або факторів, досліджуваних у рамках декомпозиційного аналізу, як відносна зміна або в абсолютних величинах. У табл. 1 представлено відмінність між адитивною і мультиплікативною конфігураціями [7]. У разі повної декомпозиції залишковий член RSD в адитивному аналізі повинен дорівнювати ($RSD = 0$), тоді як в мультиплікативному й декомпозиції - $RSD = 1$.

Метод прямого індексу Ласпейреса (табл.3) відомий легкістю використання. Однак у цьому

методі є залишковий член, який може бути значним (зокрема при розгляді тривалих періодів часу або дуже швидких змін, як при рецесії або експансії) і викликає питання точності і застосовності результатів декомпозиції з використанням цього методу [7].

Загалом ІЕА виділяє 5 секторів: житловий сектор, послуг, промисловість, транспорт та інші, для яких і формуються напрям підвищення якості розробки стратегії шляхом більш ефективного використання показників для моніторингу результатів у сфері енергоефективності.

Таблиця 1

Аддитивний (у вигляді суми)	Мультиплікативний (у вигляді добутку)
$\Delta E = E_{ACT} + E_{STR} + E_{INT} + E_{RSD}$	$R = R_{ACT} \cdot R_{STR} \cdot R_{INT} \cdot R_{RSD}$
$\Delta E = E^{Year T} - E^{Year 0}$	$R = \frac{E^{Year T}}{E^{Year 0}}$

Примітки: ACT – діяльність; STR – структура; INT – енергоємність; RSD - залишковий

Таблиця 2

	Аддитивний	Мультиплікативний
Вплив діяльності (A)	$E_t^A = \sum_i L(E_i^T, E_i^0) \cdot \ln\left(\frac{A^T}{A^0}\right)$	$R_t^A = \exp \sum_i \left(\frac{L(E_i^T, E_i^0)}{L(E^T, E^0)} \cdot \ln\left(\frac{A^T}{A^0}\right) \right)$
Структурний вплив (S)	$E_t^S = \sum_i L(E_i^T, E_i^0) \cdot \ln\left(\frac{S_i^T}{S_i^0}\right)$	$R_t^S = \exp \sum_i \left(\frac{L(E_i^T, E_i^0)}{L(E^T, E^0)} \cdot \ln\left(\frac{S_i^T}{S_i^0}\right) \right)$
Вплив енергоємності (I)	$E_t^I = \sum_i L(E_i^T, E_i^0) \cdot \ln\left(\frac{I_i^T}{I_i^0}\right)$	$R_t^I = \exp \sum_i \left(\frac{L(E_i^T, E_i^0)}{L(E^T, E^0)} \cdot \ln\left(\frac{I_i^T}{I_i^0}\right) \right)$
E^T – енергоспоживання в T -й рік E^0 – енергоспоживання в 0 -й рік i – підсектор або вид кінцевого використання		$L(a, b) = \frac{a - b}{\ln a - \ln b}, a, b > 0,$ $a \neq b$

Таблиця 3

	Аддитивний	Мультиплікативний
Вплив діяльності (A)	$E_t^A = A_t \cdot \sum_i S_0^i \cdot I_0^i - E_0$	$R_t^A = \frac{A_t \cdot \sum_i S_0^i \cdot I_0^i}{E_0}$
Структурний вплив (S)	$E_t^S = A_0 \cdot \sum_i S_t^i \cdot I_0^i - E_0$	$R_t^S = \frac{A_t \cdot \sum_i S_0^i \cdot I_0^i}{E_0}$
Вплив енергоємності (I)	$E_t^I = A_0 \cdot \sum_i S_0^i \cdot I_t^i - E_0$	$R_t^I = \frac{A_t \cdot \sum_i S_0^i \cdot I_0^i}{E_0}$
t – кінцевий рік; 0 – базовий рік; i – підсектор або вид кінцевого використання		

© Денисюк С. П., Опришко В. П., 2015

Економію енергії в результаті скорочення енергоемності можна визначити як різницю між гіпотетичним і фактичним енергоспоживанням.

$$SAVINGS_t^i = HEU_t^i - E_t.$$

Аналіз можна розширити, включивши в розгляд зміни викидів CO₂ шляхом введення параметрів структури споживання палива і вміст вуглецю (або CO₂ ємності) в якості додаткових факторів. структура споживання палива може використовуватися для опису змін у долях різних видів палива (включаючи електроенергію) в кінцевому споживанні, а вміст вуглецю позначає викиди CO₂ на одиницю спожитої енергії.

$$F_t^{i,f} = \frac{E_t^{i,f}}{E_t^i}; \quad C_t^{i,f} = \frac{G_t^{i,f}}{E_t^i}.$$

Викиди CO₂ в секторі можна розкласти на результати впливу діяльності, структури, енергоемності, структури споживання палива, а також вміст вуглецю, у відповідності з наступною формулою, де f позначає тип палива:

$$G_t = A \cdot \sum_i \left[S_t^i \cdot I_t^i \cdot \sum_f F_t^{i,f} \cdot C_t^{i,f} \right].$$

Це робить можливим розрахунок гіпотетичних викидів CO₂, а також величини скорочення викидів. Наприклад, дві наступні формули

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національні пріоритети енергоефективності 2010 [Текст] / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, А.В. Праховник [та ін.]. – К.: Текст, 2010. – 580 с.
2. Денисюк С. П. Особливості реалізації політики енергоефективності – пріоритети України [Текст] / С.П. Денисюк // Енергетика: економіка, технології, екологія. – К., 2013. – № 3 (34). – С. 7-20.
3. Денисюк С.П. Формування політики підвищення енергетичної ефективності – сучасні виклики та європейські орієнтири [Текст] / С.П. Денисюк // Енергетика: економіка, технології, екологія. – К., 2013. – № 2 (33). – С. 7-23.
4. Стогній Б.С. Інтелектуалізація енергетики. Пріоритетний напрям розвитку енергетичного сектора України [Текст] / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Енергосбережение. – К., 2012. – № 10 (156). – С. 27-29.
5. International Energy Agency. Energy Efficiency Indicators: Essentials for Policy Making. [Text]. – Paris: OECD/IEA, 2014. – 405 p.
6. Отчет о рынке энергоэффективности [Текст] / пер. с англ. – Paris: OECD/IEA, 2013. – 205 p.
7. Показатели энергоэффективности: основы статистики [Текст] / пер. с англ. – Paris: OECD/IEA, 2014. – 383 p.

© Денисюк С. П., Опришко В. П., 2015

представляють вплив вмісту вуглецю і відповідне скорочення викидів.

$$G_t^C = \frac{A_0 \cdot \sum_i \left[S_0^i \cdot I_0^i \cdot \sum_f \left(F_0^{i,f} \cdot C_t^{i,f} \right) \right]}{G_0};$$

$$CO2SAVINGS_t^C = \frac{G_t}{G_t^C} - G_t.$$

Висновки

Використовуваний ІЕА метод декомпозиції дозволяє спостерігати вплив елементів, що відносяться до енергоемності та ємності вуглецю, окремо від змін у складових енергоспоживання, пов'язаних зі структурою і діяльністю. Це допомагає і визначати найбільш ефективні напрямки заходів, і відслідковувати прогрес після їх реалізації.

Метою такого роду декомпозиції є: кількісна оцінка внеску певних факторів у зміну енергоспоживання; виявлення джерела змін енергоспоживання; вимірювання ефективності енергетичної політики і технологій.

Саме за допомогою інтеграції показників енергетичної ефективності передбачається досягнення цілей, спрямованих на ефективне вирішення наведених технологічних завдань в секторі залізничного транспорту.

REFERENCES

1. Nacionalni priorytety enerhoefektyvnosti 2010 [National priorities for energy efficiency] / B.S. Stohnij, O.V. Kyrylenko, A.V. Praxovnyk [and others]. – K.: Tekst, 2010. 580 p.
2. Denysyuk S. P. Osoblyvosti realizaciyi polityky enerhoefektyvnosti – priorytety Ukrainy [Features of energy efficiency implementation - priorities of Ukraine] / S.P. Denysyuk // Enerhetyka: ekonomika, tehnolohiyi, ekolohiya. Kyiv., 2013. № 3 (34). p. 7-20.
3. Denysyuk S.P. Formuvannya polityky pidvyshchennya enerhetychnoyi efektyvnosti – suchasni vyklyky ta yevropejs'ki oryentyry [Formation of energy efficiency policies - challenges and european guidelines] / S.P. Denysyuk // Enerhetyka: ekonomika, tehnolohiyi, ekolohiya. K., 2013. № 2 (33). p. 7-23.
4. Stohnij B.S. Intelektualizaciya enerhetyky. Priorytetnyj napryam rozvytku enerhetychnoho sektora Ukrainy [Intellectual energy. Priority of the ukrainian energy sector development] / B.S. Stohnij, O.V. Kyrylenko, S.P. Denysyuk // Enerhosberezhennye. K., 2012. № 10 (156). p. 27-29.
5. International Energy Agency. Energy Efficiency Indicators: Essentials for Policy Making. [Text]. – Paris: OECD/IEA, 2014. 405 p.
6. Otchet o rynke enerhoefektyvnosti [Report on

Надійшла до друку 06.05.2015.

energy efficiency market] / – Paris: OECD/IEA, 2013. 205 p.

7. Pokazately enerhoeffektyvnosti: osnovy statystyky [Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics] / – Paris: OECD/IEA, 2014. 383 p.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

В статті проаналізовано та досліджено особливості показників енергетичної ефективності для транспортного сектору. Ретельно розглянуті тенденції енергоспоживання пасажирського та вантажного залізничного транспорту. Проаналізовано показники енергоефективності для сектору залізничного транспорту за трьома рівнями. Досліджено методику IEA для аналізу тенденцій енергоспоживання. Проілюстровано піраміди показників енергоефективності для вантажного та пасажирського залізничного транспорту. Представлено різні форми декомпозиційного аналізу для відокремлення факторів у структурній і кількісній складових енергоспоживання.

Ключові слова: енергоефективність; енергоспоживання; енергетична система; показники енергоефективності; декомпозиція.

УДК 621.31

С. П. ДЕНИСЮК, В. П. ОПРЫШКО (НТУУ «КПІ»)

Институт энергосбережения и энергоменеджмента, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», 03056, Киев, ул. Борщаговская 115, тел.: (093) 750-13-90, эл. почта: spdens@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680

ИНТЕГРАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В ПРОЦЕСС ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В СЕКТОРЕ ТРАНСПОРТА

В статье проанализированы и исследованы особенности показателей энергетической эффективности для транспортного сектора. Тщательно рассмотрены тенденции энергопотребления пассажирского и грузового железнодорожного транспорта. Проанализированы показатели энергетической эффективности для сектора железнодорожного транспорта по трем уровням. Исследовано методику IEA для анализа тенденций энергопотребления. Проиллюстрировано пирамиды показателей энергоэффективности для грузового и пассажирского железнодорожного транспорта. Представлены различные формы декомпозиционного анализа для обособления факторов в структурной и количественной составляющих энергопотребления.

Ключевые слова: энергоэффективность; энергопотребление; энергетическая система; показатели энергоэффективности; декомпозиция.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Андриенко П. Д.*

UDC 621.31

S. P. DENYSIUK, V. P. OPRYSHKO (NTUU «KPI»)

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 03056, Kyiv, Borschagivska st., 115, tel.: (093) 750-13-90, e-mail: spdens@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680

INDICATORS ENERGY INTEGRATION IN ENERGY EVALUATION PROCESS OF TRANSPORT

The present article deals with characteristics of energy efficiency for transport sector. Carefully considered the trend of energy consumption in passenger and freight rail transport. Energy efficiency indicators for the rail transport sector analyzed on three levels. Studied IEA technique for analyzing of energy consumption trends. Given pyramid illustration of freight and passenger rail transport energy efficiency factors. Presented the various forms of decomposition analysis for factors isolation in the structural and quantitative components of energy consumption.

Keywords: energy efficiency; energy consumption; energy system; energy efficiency; decomposition.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

© Денисюк С. П., Опрышко В. П., 2015

T. I. KIRILYUK, D. O. BOSIY (DNURT)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: tanya_kir@bigmir.net, dake@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-8580-9719

THE SCHEME REALIZATION FOR THE INDIRECT METERING OF ENERGY LOSSES IN A CONTACT LINE

Introduction

The volume of energy losses in electric grids is a main indicator of efficiency of their work, visual status indicator system of power registration, efficiency of power supply organizations.

This indicator clearly shows the problems that require emergency solutions in development, reconstruction and modernization of power networks, improved methods and tools for their operation and management in improving the accuracy of electricity metering, fundraising efficiency for electricity consumed. The relative energy losses in transmission and distribution in electric networks can be considered satisfactory, if they do not exceed 4-5 %. Energy losses of 10 % can be considered the maximum acceptable in terms of process of transmission of electric power by networks.

A number of trends that adversely affect to level of losses in contact line were emerged in connection with the low investment in development and modernization of electric networks, improving their management systems regimes in accounting electricity.

Against the background of the changes taking place in the economic mechanism of energy the problem of reducing energy losses in the contact line not only lost its relevance, but rather pushed into one of the objectives of financial stability of power supply organizations.

Determination of energy losses in the contact line of electrified railways has a number of features that are primarily caused by variable size and location of the load which does not take into account a number of factors that affect the magnitude of losses [1-3]:

1. Meters of electric locomotives are often given an understated the value of consumed electricity. There are several reasons:

- inability of meters to take into account small load at the idle at prohibiting signals and stations;
- measurement errors when connecting the winding of voltage meter to the winding of transformer own needs of the electric locomotive AC;
- cases of artificial distortion of meter readings by individual driver.

2. The limits of certain railways don't meet the limits of the shoulders of service locomotives.

3. Traction and industrial consumers are powered from the traction substations. The energy consumption of industrial consumers partially takes into account by the meters of these consumers and partially calculated using the established capacity of transformers.

4. Feeders that feed a power network aren't always equipped by meters etc.

Review of the literature

It is proved [1-5] that electricity losses in the contact line appropriately determined using indirect methods.

The energy losses in contact line are calculated by the next formula [5]:

$$\Delta W = k_l \cdot \int_0^T I_f^2(t) dt, \quad (1)$$

where ΔW – energy losses in contact line, kW·h;

k_l – energy losses coefficient;

$I_f^2(t)$ – square of feeder's current in the given time, A²;

T – time of moving the train in the area, h.

This method is based on using meter of losses. This method is based on the register values of per square ampere - hours on the feeders of traction substations. The meter is located on the feeder. It measures values of per square ampere – hours in the unit of time and scales them to the energy losses using the energy losses coefficient. The first meter of energy losses for an alternating current F440P was developed on the base of meter F440 in Rostov Institute of Railway Transport [6].

The galvanic isolation on the alternating current is provided by current transformer and additionally LEM-flex converter. It is possible using the analog optocoupler for direct current measuring.

The meter of energy losses F440P can take into account losses in networks at the time of changing of load to 200% of nominal. Its error in the range changing load doesn't exceed 2 %.

© Kirilyuk T. I., Bosiy D. O., 2015

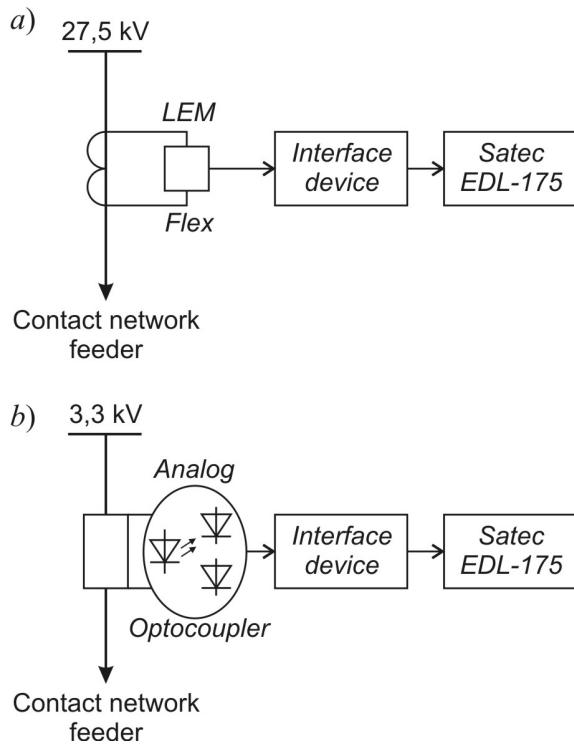


Fig. 1. The principal schemes of connecting devices for measuring losses in the contact line: a) an alternating current feeder; b) a direct current feeder

The first meter of energy losses for a direct current SKVT F607P was developed on the base of meter SKVT F607.

In electric circuit of meter of energy losses SKVT F607 were done a lot of changing. There are deleted node ban self-propelled, corrected modes transistors and circuits, power supply modernized in terms of increasing insulation strength.

Such meter of electricity losses can be realized on the modern element base, combining commercial accounting of electricity and the calculation on the energy losses based on a single device, such as Alpha Plus meter (A2) and specialized software package AlphaPlus_LS. The latest development of Elster Metronika is Microprocessor meter alpha A1800 with the function of accounting losses (in the modification counter present letter V) and specialized software package Metercat (AlphaPlus W2.1) [7].

A detailed study of the indirect method for determining of electricity losses in the contact lines and determining the expressions for loss coefficient were done in the publications [2, 3, 5, 8-11].

Formulation of the problem

Meters of energy losses aren't widely used in metering of electric energy in traction substations. Besides quite a few substations have meters on the feeders of contact line. Only one type of modern meters as an additional option has a function integration of the square of the current and for the most

part this possibility in other counters unavailable. But in the distances of power supply are used modern portable analyzers of power consumption, the device particular EDL-175 by Satec company.

One of its functionality is the integration of RMS value of the current. That is calculation of ampere-hours, which are measured by Rogowski mites and matching device that converts input current and appropriate signal using a separate integrator. The output signal of the integrator is connected to the special connector main unit, which performs further calculations of the RMS value of the current and its integration in the time.

The ampere-square-hour can be determine using the described functions of the device if the convert signal between integrator of Rogowski mites and interface device.

In general, the device performs the determination of the RMS value of current for its momentary value at the period of fundamental frequency T

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}.$$

Transfer function of the interface device is defined that after integration squared RMS value of the current will be received. Namely a functional equation will be solved.

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T F^2[i(t)] dt} = I^2, \quad (2)$$

where $F[i(t)]$ – unknown function.

Assume that the desired function is equal to the square of the RMS current value that is $F[i(t)] = i^2(t)$. Substituting the assumption in equation (1) and check it.

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^4(t) dt} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^4 \sin^4 \omega t dt} = I_m^2 \times \\ &\times \sqrt{\frac{1}{\omega T} \left[-\frac{\cos \omega t \sin^3 \omega t}{4} - \frac{3 \sin 2\omega t}{16} - \frac{3\omega t}{8} \right]_0^T} = \\ &= \frac{\sqrt{6}}{4} I_m^2 \neq I^2. \end{aligned}$$

That assumption regarding $F[i(t)]$ is false because the result is not equal to the square of the RMS value of the input signal.

Analyzing the previous result, we assume that the transfer function equal to product RMS and

instantaneous current value that is $F[i(t)] = I \cdot i(t)$. Will provide appropriate substitution in equation (2) and check it.

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 \cdot i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 \cdot I_m^2 \sin^2 \omega t dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{I^2 \cdot I_m^2}{2}} = I^2 \equiv I^2.$$

The search transfer function is equal to product the RMS and the instantaneous value of current. According to the transfer function, the structure of the interface device will have next view (fig. 2).

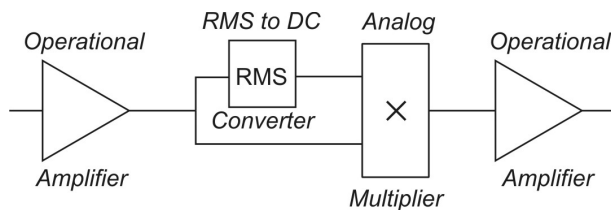


Fig. 2. Structure of the interface device

Two analog microcircuits AD637 and AD633 are used for scheme realization of the interface device. These microcircuits are done operations of determining the RMS value and multiplying signals. Operational amplifiers OP-07 are used for matching input and output signals.

Microcircuit AD633 is a functional, four-quadrant analog multiplier. It consists of a high resistance differential inputs and summing entrance. Full scaling of low-voltage output of 10 V is performed using the built-in zener diode. The nonlinearity entrance is less than 0.1%, and output

noise less than 100 mkV in the frequency band from 10 Hz to 10 kHz.

The voltage of power supply of microcircuits AD633 is from ± 8 V to ± 18 V. Inputs have negative polarity, but they are fully differential and many modifications can have a reverse polarity, or be manageable. The signals of differential inputs are converted to current. The result of the multiplication of these currents is generated by the kernel. Characteristics of built zener provides total zoom factor of 10 V. Nodal Point allows to add two or more inputs, increasing gain, convert output voltage to a current, and configure various applications.

The circuit implementation of the device for measuring of electricity losses in the contact line is proposed in view of the described above (fig. 3).

The comparing of the electricity consumption by the meters of traction substation Belgorod – Dniester and meters of trains was done for the experimental verification of obtained theoretical results. The section of Carolina - Bugaz - Belgorod – Dniester was allocated for experiment. The feeding of this section was done by the console power scheme from the feeder № 3.

Electricity losses in the contact line determined as the difference between meter of substation and the sum of electric meters of trains were $\Delta W_{kl} = 1107$ kW·h.

Electricity losses in the contact line measured by the device (fig. 3) were $\Delta W_{kl} = 1166,8$ kW · h. Error δ was 5,4 %.

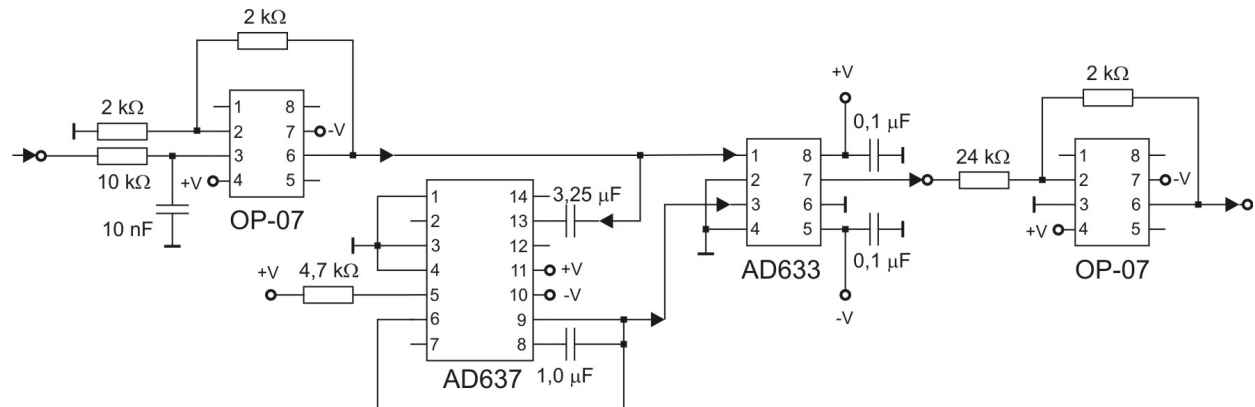


Fig. 3. The circuit implementation of the device for measuring of electricity losses in the contact line

Conclusions

Current converter, which in combination with a portable power analyzer can measure square of current is designed. Setting of this device with proposed energy losses coefficient allows measur-

ing the losses in the contact line in the absence of the meter.

REFERENCES

1. Tevs A. A Sovershenstvovaniya metoda operativnykh raschetov poter moshchnosti i elektroenergii v elementakh SES s ispolzovaniem dannykh sistemy AIISKUE: Avtoref. dis [Improvement of methods of operative calculation of power losses and power in the elements of SES system using the data AIISKUE]. Omsk, 2007, 27 p.
2. Kuznetsov W. G., Bosiy D. A., Kirilyuk T. I. Oblik vtrat elektrychnoi enerhii v tiahovii mrezhi nepriamym sposobom [Accounting electricity losses in traction network by the indirect method]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2012, issue 42, pp. 103-109.
3. Maksimczuk W. F., Kuzniecova W. G., Kalasznikov K. A., Kirilyuk T. I. Badania rezerw zasilania poprzez racjonalne rozmieszczenie pociagow na odcincu [Badania rezerw zasilania poprzez racjonalne rozmieszczenie pociagow na odcincu] *Infrastruktura transport (Poland)*. [Infrastruktura transport (Poland)], 2013, issue 2, pp. 28-31.
4. Bardushko V. D. Analiz i parametricheskiy sintez sistem tyagovogo elektrosnabzheniya. Avtoreferat Diss. [Analysis and parametric synthesis of the traction power supply systems]. Irkutsk, 2001, 42 p.
5. Kirilyuk T. I. Udoskonalennja metodu kontrolju vtrat elektroenerghiji v kontaktnej mrezhi elektrofikovanykh zaliznycj: Avtoref. dys. [Improving the control method of energy losses in contact line of railways]. Dnepropetrovsk, 2013, 22 p.
6. Bykadorov A. L. Uchet poter elektroenergii na elektrifitsirovannykh uchastkakh peremennogo toka [Accounting for electricity losses on electrified sections AC] *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport], 1980, issue 4, pp. 57-59.
7. Alfa A1800 schetchik elektricheskoy energii trekhfaznyy mnogofunktsionalnyy: Passport. [Alpha A1800 three-phase electric energy meter multi-function: Passport] Moscow, Elster Metronica, 2007, 35 p.
8. Bosiy D. A., Kirilyuk T. I. Udoskonalennia nepriamoho metodu obliku vtrat elektrychnoi enerhii v kontaktnej mrezhi. [Improvement indirect method of accounting electricity losses in the contact system] *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohiy* [Eastern-European Journal of enterprise technologies], 2012, issue 5/8 (59), pp. 35-39.
9. Kuznetsov W. G., Bosiy D. A., Kirilyuk T. I. Vyznachennia rehlamentu zminy koefitsiienta vtrat [Determination of regulation changes of the energy losses coefficient] *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KPU»], 2013, issue 56, pp. 193-198.
10. Kirilyuk T. I. Metod vyznachennia koefitsiienta vtrat na osnovi povnoho faktornoho eksperymentu [The method of determining the energy losses coefficient on the base of full factorial experiment] *Enerhosberezhenye. Enerhetika. Enerhoaudit* [Energy saving. Power engineering. Energy audit], 2013, issue 11 (117), pp. 24-29.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тевс А. А. Совершенствования метода оперативных расчётов потерь мощности и электроэнергии в элементах СЭС с использованием данных системы АИISKУЭ: Автореф. дис....канд. техн. наук: 05.14.02 / Омский государственный технический университет. – Омск, 2007. – 27 с.
2. Кузнецов В. Г. Облік втрат електричної енергії в тяговій мережі непрямим способом. / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна – 2012 – Вип. 42. – С. 103-109.
3. Maksimczuk W. F. Badania rezerw zasilania poprzez racjonalne rozmieszczenie pociagow na odcinku / T.I. Kiriluk, K.A. Kalasznikov, W. G. Kuzniecova, W.F. Maksimczuk // *Infrastruktura transportu*. – 2013. – № 2. – С.28-32.
4. Бардушко В. Д. Анализ и параметрический синтез систем тягового электроснабжения: Автореф. дис....д-ра. техн. наук: 05.13.01 / ИрГУПС –Иркутск, 2001. – 42 с.
5. Кирилюк Т. І. Удосконалення методу контролю втрат електроенергії в контактній мережі електрифікованих залізниць: Автореф. дис....канд. техн. наук: 05.22.09 / ДНУЗТ –Дніпропетровськ, 2013. – 22 с.
6. Быкадоров А. Л. Учёт потерь электроэнергии на электрифицированных участках переменного тока / А. Л. Быкадоров // Железнодорожный транспорт. – 1980. – № 4. – С. 57-59.
7. Альфа А1800 счётчик электрической энергии трёхфазный многофункциональный: Паспорт. – М. : Эльстер Метроника, 2007. – 35 с
8. Босий Д. О. Удосконалення непрямого методу обліку втрат електричної енергії в контактній мережі / Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Східно – Європейський журнал передових технологій – 2012 – № 5/8 (59)– С. 35-39.
9. Кузнецов В. Г. Визначення регламенту зміни коефіцієнта втрат / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Вісник національного технічного університету «ХПІ» – 2013 – №56 – с. 193-198.
10. Кирилюк Т. І. Метод визначення коефіцієнта втрат на основі повного факторного експерименту / Т. І. Кирилюк // Енергосбережение. Енергетика. Енергоаудит – 2013. – № 11 (117) – С. 24-29.
11. Kirilyuk T. I. Modeling the coefficient of energy losses in a contact line based on the Monte-Carlo method / T. I. Kirilyuk // Електрифікація транспорту – 2014. – № 8 – С. 40-48.

Received 15.05.2015.

© Kirilyuk T. I., Bosiy D. O., 2015

11. Kirilyuk T. I. Modeling the coefficient of energy losses in a contact line based on the Monte-Carlo method. *Elektryfikacija transportu* [Electrification of transport], 2014, issue 8, pp. 40-48.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

The volume of energy losses in electric grids is showed problems which need emergency solutions in development, reconstruction and technical modernization of power networks, improved methods and tools for their operation and management in improving the accuracy of electricity metering, fundraising efficiency for electricity consumed etc. The relative energy losses in electric networks can be considered satisfactory, if they do not exceed 4-5 %. Energy losses of 10 % can be considered the maximum acceptable in terms of process of transmission of electric power by networks.

Determination of energy losses in the contact line of electrified railways has a number of features that are primarily caused by variable size and location of the load which does not take into account a number of factors that affect the magnitude of losses. The indirect method of energy losses metering is based on the register values of per square ampere-hours on the feeders of traction substations. The meter of energy losses shows value of energy losses depending on the measured in the unit of time next factors. They are square ampere-hours, calculated energy losses coefficient, measurement period of energy losses and the square of the actual conversion coefficient.

The matching device for analog microcircuits AD637 and AD633 was used as the realization of the circuit of the device as part of the measuring complex with the analyzer power Satec EDL-175. These analog microcircuits are done determination of the RMS value and multiplication of signals with the agreement of the input and output signals by the precision operational amplifiers OP-07.

Using the developed device allowed to determine energy losses in the contact line in the real distance with an error not exceeding 5.4%.

Keywords: energy losses, contact line, metering, indirect method, scheme, interface device.

УДК 621.331

Т. І. КИРИЛЮК, Д. О. БОСИЙ (ДНУЗТ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: tanya_kir@bigmir.net, dake@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-8580-9719

СХЕМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ НЕПРЯМОГО ОБЛІКУ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ

Обсяг втрат електроенергії в електричній мережі свідчить про проблеми, які вимагають невідкладних рішень у розвитку, реконструкції і технічному переозброєнні електричних мереж, удосконаленні методів і засобів їхньої експлуатації й керування, у підвищенні точності обліку електроенергії, ефективності збору коштів за спожиту електроенергію, тощо. Відносні втрати електроенергії в електричних мережах вважають задовільними, якщо вони не перевищують 4-5 %. Втрати на рівні 10 % вважають максимально припустимими з погляду фізики передачі електроенергії мережами.

Визначення втрат електроенергії в контактній мережі електрифікованих залізниць має ряд особливостей, які обумовлені змінним за величиною та місцезнаходженням навантаженням, що не дозволяє врахувати цілий ряд факторів. Непрямий метод виміру втрат енергії заснований на реєстрації величини ампер-квадрат-годин на фідерах тягових підстанцій. Лічильник втрат показує величину втрат в залежності від вимірюваних в одиницю часу ампер-квадрат-годин, розрахункового коефіцієнта втрат, періоду виміру втрат енергії та квадрату фактичного коефіцієнту перетворення.

Для схематичної реалізації пристрою у складі вимірювального комплексу з аналізатором потужності Satec EDL-175 застосовано пристрій узгодження на аналогових мікросхемах AD637 та AD633, які виконують визначення діючого значення та множення сигналів з узгодженням вхідного та вихідного сигналу прецизійними операційними підсилювачами OP-07.

Застосування розробленого пристрою дозволило визначити втрати на реальній ділянці з похибкою не більше 5,4 %.

Ключові слова: втрати електроенергії, контактна мережа, облік, непрямий метод, схема, пристрій узгодження.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

УДК 621.331

Т. И. КИРИЛЮК, Д. А. БОСЫЙ (ДНУЖТ)

Кафедра Електроснабження залізничних доріг, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: tanya_kir@bigmir.net, dake@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-8580-9719

СХЕМНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА НЕПРЯМОГО УЧЕТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Объемы потерь электрической энергии в электрических сетях свидетельствуют о проблемах, которые требуют неотлагательных решений в развитии, реконструкции и техническом перевооружении электрических сетей, усовершенствовании методов и средств их эксплуатации и управления, повышении точности учета электроэнергии, эффективности сбора средств за потребленную электроэнергию, и т.п. Относительные потери электроэнергии в электрических сетях считают удовлетворительными, если они не превышают 4-5 %. Потери на уровне 10 % считают максимально допустимыми с точки зрения физики передачи электроэнергии сетями.

Определение потерь электроэнергии в контактной сети электрифицированных железных дорог имеет ряд особенностей, которые обусловлены переменной по величине и местоположению нагрузке, которые не позволяют учесть целый ряд факторов. Непрямой метод измерения потерь электроэнергии основан на регистрации величины ампер-квадрат-часов на фидерах тяговых подстанций. Счетчик потерь показывает величину потерь в зависимости от измеренных в единицу времени ампер-квадрат-часов, расчетного коэффициента потерь, периода измерения потерь электроэнергии и квадрата фактического коэффициента преобразования.

В качестве схмотехнической реализации устройства в составе измерительного комплекса с анализатором мощности Satec EDL-175 применено устройство согласования на аналоговых микросхемах AD637 и AD633, которые выполняют определение действующего значения и умножение сигналов с согласованием входного и выходного сигнала прецизионными операционными усилителями ОР-07.

Применение разработанного устройства позволило определить потери на реальном участке с ошибкой не более 5,4 %.

Ключевые слова: потери электроэнергии, контактная сеть, учет, не прямой метод, схема, устройство согласования.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

На електрифікованому залізничному транспорті від значення напруги в тяговій мережі в першу чергу залежить швидкість руху електро-возів, пропускна та провізна спроможність ділянки. Правилами улаштування системи тягового електропостачання залізниць України [1] встановлені діючі значення напруги на шинах тягових підстанцій і струмоприймачах електро-рухомого складу (ЕРС) у нормальному і вимушеному режимах системи електричної тяги. Очевидно, що напруга на струмоприймачах електро-возів, які знаходяться на фідерній зоні, не може бути постійною і рівною 3,0 кВ навіть за наявності на зоні пристроїв регулювання. Однак прагнення до звуження діапазону відхилення напруги є основною умовою забезпечення номінального режиму роботи тягових і допоміжних машин електро-воза. При цьому необхідно враховувати, що підвищення рівня напруги на струмоприймачі електро-воза сприяє підвищенню технічної швидкості руху поїзда, а при збереженні споживаної потужності веде до зниження струму електро-воза. Тому для досягнення більш високих енергетичних показників системи тягового електропостачання постійного струму та підвищення енергоефективності ЕРС при високих швидкостях руху необхідно впроваджувати системи для звуження діапазону відхилення напруги на струмоприймачах швидкісного ЕРС.

Мета роботи – визначення рівня напруги в контактній мережі для забезпечення мінімальних втрат електроенергії в залежності від напруги на шинах тягових підстанцій та потужності підсилюючого пункту.

Вплив зміни напруги на роботу електро-рухомого складу

Основними вимогами, що висувуються з боку електрорухомого складу до системи тягового електропостачання є забезпечення рівня напруги на струмоприймачі, який би гарантував досягнення заданої швидкості, обумовленої

графіком руху, та забезпечував надійну та справну роботу всіх елементів ЕРС.

Вплив зміни напруги на зміну швидкості руху електро-возів постійного струму з двигунами послідовного збудження з врахуванням схеми з'єднання тягових двигунів, приведенного ухилу, коефіцієнту послаблення збудження та ваги поїзда змінюється в межах [2]:

$$\frac{dv}{dU} = 0,01 \dots 0,03 \frac{\text{км/год}}{\text{В}}. \quad (1)$$

Як видно з (1), в усталеному режимі роботи ЕРС залежність зміни швидкості від зміни напруги невелика, що обумовлено значною інерційністю поїзда. Але при зниженій напрузі збільшується час розгону поїзда для досягнення встановленої швидкості та час ходу електро-воза під струмом для її збереження. Таким чином, збільшується загальний час ходу електро-возу під струмом, що призводить до додаткових витрат електроенергії.

При слідуванні поїзда розрахунковим підйомом зниження напруги на струмоприймачі призводить до зростання температури обмоток електродвигунів та зниження пропускної спроможності ділянки через збільшення часу ходу поїзда. Також зниження напруги зменшує продуктивність роботи допоміжного обладнання, а саме мотор-вентиляторів та мотор-компресорів. Внаслідок цього погіршуються умови охолодження тягових двигунів та іншого електрообладнання, збільшується час відпуску пневматичних гальм поїзда.

За умовами надійності роботи ЕРС, з одного боку, повинен забезпечуватись рівень напруги, не нижчий за мінімально допустимий з умов нагрівання тягових двигунів та двигунів допоміжного обладнання. З іншого – не перевищувати максимально допустимого значення за потенційними умовами на колекторі для запобігання виникнення кругового вогню. На ділянках з можливістю рекуперації напруга в тяговій мережі повинна забезпечувати мінімально допустиме значення на струмоприймачах електро-возів, що знаходяться в режимі тяги і не пе-

ревищувати значення на струмоприймачі рекупуючого електровозу.

Таким чином, напруга в тяговій мережі повинна задовольняти вимогам (2) для забезпечення сталої швидкості поїзда та умов для режиму рекуперації. Також значення напруги в контактній мережі повинне забезпечувати мінімальні втрати електроенергії при реалізації графіка руху поїздів.

$$U_{\min} < U_{\text{етяг}} \leq U_{\text{тм}} < U_{\text{ерекуп}} \leq U_{\max}, \quad (2)$$

де U_{\min} – мінімально допустиме значення напруги в контактній мережі, В;

$U_{\text{етяг}}$ – значення напруги на струмоприймачі електровозу, якій знаходиться в режимі тяги, В;

$U_{\text{тм}}$ – напруга в тяговій мережі, В;

$U_{\text{ерекуп}}$ – значення напруги на струмоприймачі електровозу, якій знаходиться в режимі рекуперації, В;

U_{\max} – максимальне значення напруги в контактній мережі, В.

Але чітке дотримання поставлених вимог неможливе, оскільки на величину розмаху і тривалість змін напруги діє багато чинників, тому даний процес можна розглядати як стохастичний. Серед впливаючих факторів, можна відзначити рівень напруги на шинах тягових підстанцій, який характеризується досить великим розкидом значень, викликаних коливаннями напруги в живлячій енергосистемі та змінами тягового навантаження. Не менш важливими є втрати напруги в тяговій мережі, які, в свою чергу, залежать від струму електровозу, його місцезнаходження та взаємного розташування інших потягів на фідерній зоні та їх режимів роботи. Очевидно, доцільним було б забезпечення такого режиму напруги в тяговій мережі, який би найбільшою мірою задовольняв поставлених умові (2).

Застосування на тягових підстанціях пристроїв автоматичного регулювання та керування перетворювальних агрегатів зі стабілізацією вихідної напруги дозволяє ліквідувати лише вплив коливань живлячої енергосистеми та падіння напруги на внутрішньому опорі тягових підстанцій. Вплив втрат напруги в опорі проводів контактної мережі міжпідстанційної зони від тягового навантаження зберігається. Тому, в окремих випадках, при жорстких вимогах до якості напруги, наприклад, на ділянках зі швидкісним рухом, впровадження стабілізації лише на шинах тягових підстанцій буде недостатнім.

Для вирішення даної проблеми додатково стабілізують напругу в контактній мережі.

Досягнення і стабілізація заданого рівня напруги на міжпідстанційній зоні потребує побудови розподіленої системи вимірювань та на її основі системи керування у реальному часі. Однак, як зазначалось в [3] створення такої слідкуючої системи при наявності декількох потягів в зоні, коли втрата напруги до кожного з них буде відрізнятися, дуже важке та не доцільне. Тому широкого застосування набули системи стабілізації на посту секціонування, які довели свою ефективність значно знизивши коефіцієнт варіації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу.

На сучасному етапі розвитку техніки та технологій стає можливим створення слідкуючої системи автоматичного керування та побудова на її базі системи для забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачах електровозів, що дозволить досягти енергооптимальних режимів роботи СТЕ.

Забезпечення заданого рівня напруги в контактній мережі

На кафедрі «Електропостачання залізниць» ДНУЗТ розроблено спосіб [4] за допомогою якого, незалежно від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні та їх навантаження, обмежується нижній рівень напруги на струмоприймачах ЕРС (рис. 1). Такий спосіб передбачає побудову розподіленої системи вимірювань для визначення розподілу напруги уздовж міжпідстанційної зони та встановлення підсилюючого пункту на посту секціонування для зменшення втрат напруги до струмоприймачів електровозів.

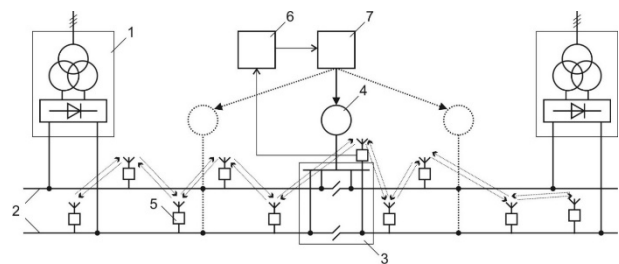


Рис. 1. Схема електропостачання ділянки електрифікованої залізниці. 1 – тягова підстанція; 2 – контактна мережа; 3 – пост секціонування; 4 – підсилюючий пункт тягової мережі; 5 – пристрій вимірювання напруги з бездротовою передачею даних; 6 – блок декодування даних; 7 – система управління

Для визначення необхідного струму підсилюючого пункту для забезпечення заданого рівня напруги запишемо рівняння балансу

втратах напруги в контактній мережі. В загальному вигляді матимемо

$$\Delta U'_k(I_{\text{вир}}) + \Delta U_{\text{пп}}(x_{\text{пп}}, x_{U_{\min}}, I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}}) = \Delta U_3 + \Delta U_{\text{пп}}(I_{\text{пп}}), \quad (3)$$

де $\Delta U'_k(I_{\text{вир}})$ – падіння напруги в контактній мережі з урахуванням вирівнювального струму $I_{\text{вир}}$;

$\Delta U_{\text{пп}}(I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}})$ – падіння напруги від струму підсилюючого пункту розташованого в ко-

ординаті $x_{\text{пп}}$, зі струмом $I_{\text{пп}}$ в точці $x_{U_{\min}}$ з урахуванням вирівнювального струму $I_{\text{вир}}$;

$\Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}})$ – втрати напруги від вирівнювального струму $I_{\text{вир}}$.

ΔU_3 – втрата напруги до струмоприймача електровозу, при якій на останньому буде забезпечено заданий рівень напруги;

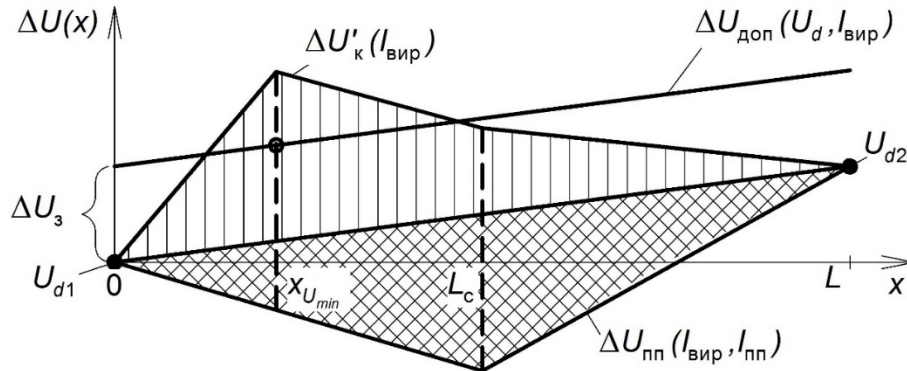


Рис. 2. До пояснення рівняння балансу втрат потужності

$$\Delta U_3 = U_{d1} - U_3, \quad (4)$$

де U_{d1} – значення випрямленої напруги на шинах першої тягової підстанції;

U_3 – заданий рівень напруги.

$$\Delta U'_k(I_{\text{вир}}) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{k1i} + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{k2i} + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}), \quad (5)$$

де ΔU_{k1i} , ΔU_{k2i} – втрати напруги від одного поїзду на першій та другій колії відповідно;

n_1, n_2 – кількість поїздів на першій та другій колії відповідно.

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{пп}}(x_{\text{пп}}, x_{U_{\min}}, I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}}) = \\ = I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}}) \cdot r_0 \cdot x_{\text{пп}} + \\ + I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}}) \cdot r_0 \cdot (L_c - x_{\text{пп}}) + \\ + I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}}) \cdot r_0 \cdot (x_{\text{пп}} - L_c) + \\ + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}), \end{aligned} \quad (6)$$

де $I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}})$ – струм в контактній мережі від підсилюючого пункту, який знаходиться в точці $x_{\text{пп}}$.

$$\begin{aligned} I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}}) = \varphi_1(x_{\text{пп}}) \cdot I_{\text{пп}} + \\ + \varphi_2(x_{\text{пп}}) \cdot I_{\text{пп}} + \varphi_4(x_{\text{пп}}) \cdot I_{\text{пп}}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_4$ – функції струморозподілу для даної схеми живлення.

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{пп}}(x_{\text{пп}}, x_{U_{\min}}, I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}}) = \\ = I_{\text{пп}} \cdot f(x) + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}), \end{aligned} \quad (8)$$

де $f(x)$ – функція опору, яка визначається із співвідношення струму підсилюючого пункту та розподілу цього струму в контактній мережі.

Тепер рівняння заданого рівня напруги матиме вигляд:

$$\begin{aligned} I_{\text{пп}} \cdot f(x) + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}) = \\ = \Delta U_3 + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}) - \Delta U'_k(I_{\text{вир}}), \end{aligned} \quad (9)$$

З рівняння (9) знаходимо струм підсилюючого пункту:

$$I_{\text{пп}} = \frac{\Delta U_3 - \Delta U'_k(I_{\text{вир}})}{f(x)}, \quad (10)$$

Як видно з виразу (10) струм $I_{\text{пп}}$ при виконанні умови $\Delta U_3 < \Delta U'_k(I_{\text{вир}})$ має від'ємне значення, що вказує на необхідність генерації додаткової потужності. Перевірка даної умови

виконується в кожен момент часу по обох коліях ділянки. До розрахунку автоматично приймається колія з більшою втратою напруги. У випадку невиконання поставленої умови підси-

люючий пункт в роботу не вмикається. Детальний алгоритм роботи системи зображено на рис. 3.

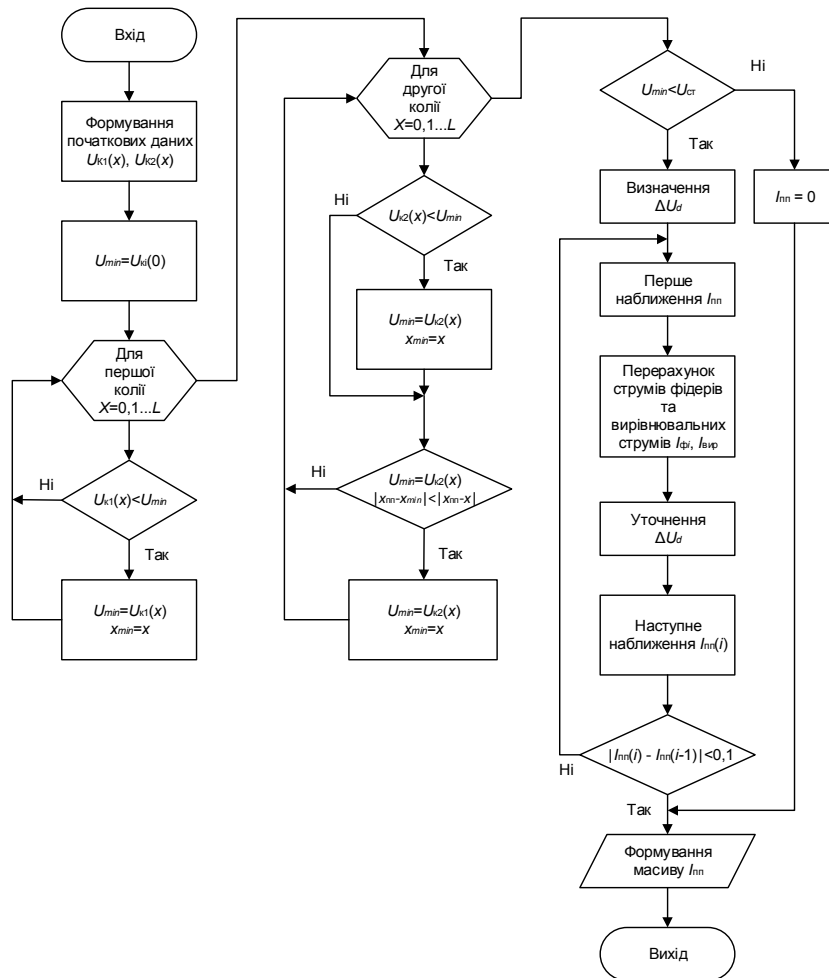


Рис. 3. Алгоритм роботи системи з обмеження нижнього рівня напруги на струмоприймачах ЕРС

Результат роботи системи при русі чотирьох поїздів розрахунковою ділянкою з напругою на шинах суміжних тягових підстанцій 3500 В та стабілізацією на рівні 3100 В зображено на рис. 5. При цьому необхідна потужність підсилюючого пункту становить близько 2 МВт, а втрати електроенергії в тяговій мережі за час виконання графіка руху зменшились на 32 %.

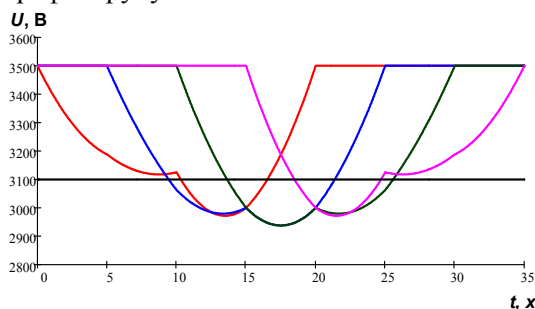


Рис. 4. Напруга на струмоприймачах електровозів без підсилюючого пункту

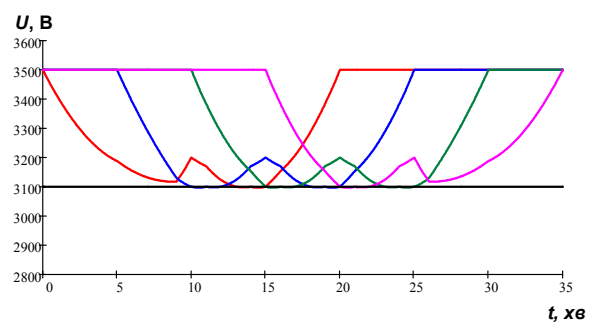


Рис. 5. Напруга на струмоприймачах електровозів при роботі підсилюючого пункту

Як видно з рис. 5 за допомогою запропонованої системи стає можливим обмеження нижнього рівня напруги, але залишається не вирішеним питання про оптимальне значення напруги для забезпечення найбільш раціонального енергетичного режиму роботи СТЕ.

Для дослідження даного питання проводились розрахунки на математичній моделі при реалізації графіка руху чотирьох поїздів з міні-

© Косарев Є. М., 2015

мальним міжпоїзним інтервалом. Дослідна ділянка довжиною 20 км отримувала живлення за вузловою схемою, тип тягової мережі М120+2МФ100+А185+Р65 (рис. 6). Підсилюючий пункт встановлено на посту секціонування. Розрахунки проводились по чергово для різних рівнів напруг на шинах суміжних тягових підстанцій від 2700 до 4000 В. При цьому змінювалась задана межа мінімального значення напруги на струмоприймачах ЕРС в діапазоні від 2700 В до значення напруги на шинах тягових підстанцій. Час реалізації графіка руху становив 35 хв.

В розрахунках приймалися наступні спрощення: електровози споживали однаковий і незмінний струм $I_e = 2000 \text{ А}$, пост секціонування знаходився в середині міжпідстанційної зони, напруга на шинах суміжних тягових підстанціях приймалася рівною та незмінною в часі, внутрішні опори тягових підстанцій мали однакове значення.

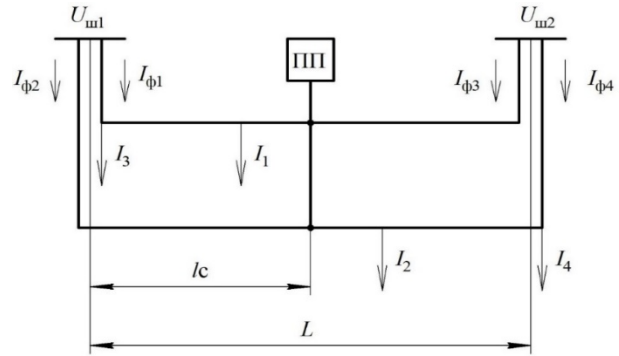


Рис. 6. Миттєва схема розрахункової ділянки

Для ряду напруг на шинах тягових підстанцій отримано зміну втрат електроенергії в тяговій мережі в залежності від рівня напруги стабілізації. Розраховано потужності підсилюючого пункту в залежності від напруги на шинах тягових підстанцій і рівня стабілізації та побудовані відповідні номограми (рис. 7).

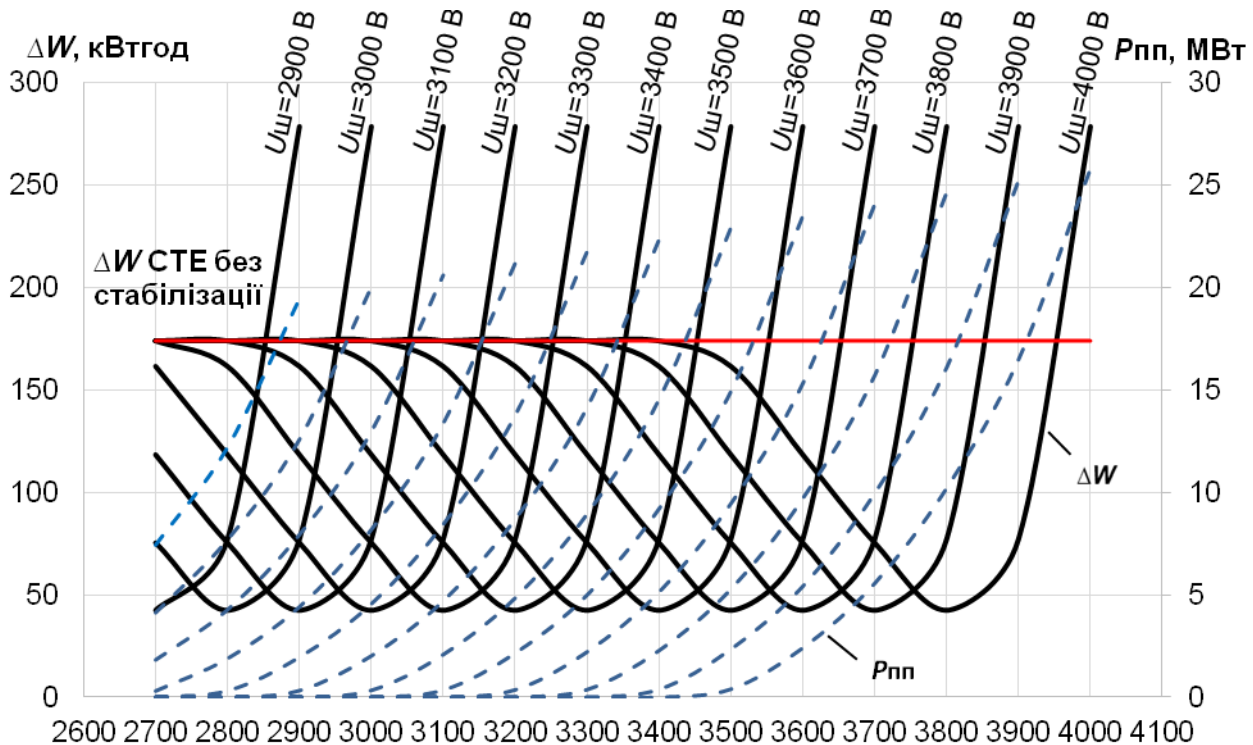


Рис. 7. Номограми потужності підсилюючого пункту та втрат електроенергії від напруги стабілізації; ΔW – втрати електроенергії в контактній мережі, $P_{пп}$ – потужність підсилюючого пункту

Проаналізувавши отримані залежності можна відзначити, що доцільно підтримувати напругу на струмоприймачах на рівні, що відповідає інтервалу спаду кривої втрат електроенергії від вихідного до мінімального значення. Забезпечення рівня напруги близького до значення на шинах ТП недоцільне через зростання

втрат енергії в результаті надлишкового регулювання та значного збільшення встановленої потужності підсилюючого пункту.

Енергооптимальний рівень напруги в контактній мережі можна визначити із співставлення величини втрат електроенергії та потужності підсилюючого пункту. Однак раціональний рі-

вень напруги в контактній мережі буде також залежати від строку окупності підсилюючого пункту, розрахованого на необхідну потужність. Остаточне визначення заданого рівня напруги повинно також враховувати потреби локомотивного господарства в неперервному та енергоефективному виконанні експлуатаційної роботи.

Висновки

Електрифікований залізничний транспорт в своїй експлуатаційній роботі залежить від режимів напруги в тяговій мережі. Рівень напруги впливає як на технічні характеристики ЕРС так і на пропускну та провізну здатність ділянки. Для досягнення високих енергетичних показників системи тягового електропостачання постійного струму та підвищення енергоефективності ЕРС при високих швидкостях руху необхідно мінімізувати відхилення напруги від за-

даних значень. Високих енергетичних показників СТЕ можливо досягти за рахунок використання способу забезпечення заданого рівня напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму. Такий спосіб забезпечує рівномірний розподіл втрат напруги вздовж міжпідстанційної зони за рахунок примусового струморозподілу в тяговій мережі в результаті генерації підсилюючим пунктом додаткової потужності.

При застосуванні запропонованого способу підвищення енергоефективності СТЕ раціональний рівень напруги в контактній мережі буде обумовлений напругою на шинах суміжних тягових підстанцій і визначатися за критерієм мінімуму втрат електроенергії в тяговій мережі та потребами локомотивного господарства для виконання встановленого графіка руху та нормальної роботи ЕРС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інструкція ЦЕ0009. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. – Введено в дію 2005-02-01. – Київ: Швидкий рух, 2005. – 80 с.
2. Добровольскис Т. П., Точность стабилизации напряжения на токоприемнике электровоза., / Т. П. Добровольскис // Сборник научных трудов ВНИИЖТа. – Москва, 1979. – Вып. 618. – С.
3. Мирошніченко Р. И. Система телеавтоматического регулирования напряжения в контактной сети (СТАРНК – ПС2-73) / Р. И. Мирошніченко, Е. А. Колодчевский, Б. Н. Свищев, Ю. А. Шипарев, Л. А. Большаков // Сборник научных трудов ВНИИЖТа. – Москва, 1977. – Вып. 580. – С 13-29.
4. Пат. 98483 Україна, МПК H02J 1/00 H02J 13/00. Спосіб стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко, Є. М. Косарев; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – u 201412905; заявл. 02.12.14; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. – 3 с.
5. Сыченко, В. Г. Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающим пунктом / В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, Е. Н. Косарев // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – Сп. вип. – Т. 2. – С. 8-18.
6. Босий, Д. О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності. // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С.15-25.
7. Гончаров Ю.П. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии./ Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, М. С. Пастушенко, Е. Н. Косарев //Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane / Instytut

REFERENCES

1. Instrukcija CE0009. Pravyla ulashtuvannja systemy tjavogovo elektropostachannja zaliznyc' Ukraïny. [Instructions CE0009. Rules arrangement traction power supply system of Ukrainian railways] – Vvedeno v diju 2005-02-01. – Kyi'v: Shvydkyj ruh, 2005. – 80 s.
2. Dobrovolskis T. P., Tochnost' stabilizatsii napryazheniya na tokopriemnike elektrovoza [Accuracy of voltage regulation in the electric current collector]. Sbornik nauchnykh trudov VNIIZhTa [Collection of the scientific works VNIIZhT], 1979, Vol. 618, pp.
3. Miroshnichenko R. I. Sistema teleavtomaticheskogo regulirovaniya napryazheniya v kontaktnoy seti (STARNK – PS2-73)[Telecontrol system of voltage controlling in the contact network (STARNK - PS2-73)] Sbornik nauchnykh trudov VNIIZhTa. [Collection of the scientific works VNIIZhT], 1977, Vol. 580. – pp 13-29.
4. D. O. Bosiy, V. G. Sichenko, E. M. Kosarev Sposib stabilizatsii naprugi v kontaktnyy mrezhi elektrifikovanoj dilyanki postiy-nogo strumu [The method of stabilization the voltage in the contact network of electrified section DC] Patent no u 201412905
5. Sychenko, V. G. Usovershenstvovanie metodologii rascheta raspredelennoy sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s usilivayushchim punktom [The improvement of calculation methodology of distribution electric power traction system with boost point] Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit [Energy saving. Power engineering Energy audit.], 2014, Spec. Vol. 2, pp 8-18.
6. Bosiy, D. O. Metodika rozrakhunku mittevykh skhem sistemi tyagovogo elektropostachannya dlya spozhivannya postiynoï potuzhnosti. [The method of calculation schemes instant traction system of power consumption constant power.] Elektrifikatsiya transportu [Electrification of transport], 2014, No 8, pp. 15-25.
7. Goncharov Yu. P. Povyshenie effektivnosti

© Косарев Є. М., 2015

Kolejnictwa. – 2014. – Вып. 162. – С. 65-82.

Надійшла до друку 12.06.2015.

funktionierovaniya tyagovogo elekt-rosnabzheniya pri primenenii vozobnovlyаемых istochnikov elektricheskoy energii. [Increasing the efficiency of the traction power supply in the application of renewable electricity sources] Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane / Instytut Kolejnictwa, 2014, Vol. 162, pp. 65-82.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

Проаналізовано вплив зміни рівня напруги на роботу електрорухомого складу. Встановлено необхідність забезпечення заданого рівня напруги в контактній мережі для виконання встановленого графіка руху і нормальної роботи всіх вузлів та елементів ЕРС. Запропоновано спосіб встановлення заданого рівня напруги на струмоприймачі електрорухомого складу. Представлено розрахунок для визначення струму підсилюючого пункту. Приведений алгоритм роботи системи обмеження нижнього рівня напруги на струмоприймачах ЕРС. Отримані залежності зміни втрат електроенергії в контактній мережі від заданого рівня напруги. За результатами розрахунків побудовані номограми для визначення енергооптимальних рівнів напруги в контактній мережі.

Ключові слова: електрична тяга; постійний струм; регулювання напруги; підсилюючий пункт.

УДК 621.331.3

Е. Н. КОСАРЕВ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна 49010, Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2, тел. +38 (056) 793-19-11, e-mail: kosarev@e.dit.edu.ua,
ORCID: orcid.org/0000-0003-3574-7414

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Проанализировано влияние изменения уровня напряжения на работу электроподвижного состава. Установлена необходимость обеспечения заданного уровня напряжения в контактной сети для выполнения установленного графика движения и нормальной работы всех узлов и элементов ЭПС. Предложен способ установления заданного уровня напряжения на токоприемники электроподвижного состава. Представлены расчет для определения тока усиливающего пункта. Приведенный алгоритм работы системы ограничения нижнего уровня напряжения токоприемников ЭПС. Полученные зависимости изменения потерь электроэнергии в контактной сети от заданного уровня напряжения. По результатам расчетов построены номограммы для определения энергооптимальных уровней напряжения в контактной сети.

Ключевые слова: электрическая тяга; постоянный ток; регулирование напряжения; усиливающий пункт.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 621.331.3

Е. М. KOSAREV (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian 49010, Dnepropetrovsk, 2 Lazarian st., tel.: (056) 793-19-11; e-mail: kosarev@e.dit.edu.ua,
ORCID: orcid.org/0000-0003-3574-7414

VOLTAGE CONTROL IN A CONTACT NETWORK OF DC ELECTRIFIED RAILWAYS

In this article was considered the changing of the voltage level on the work of electric motive power. The necessity of providing a predetermined level of voltage in the contact network to execute a defined schedule and normal operation of all components and elements of the EMP. The method of establishing a predetermined level of voltage on the electric rolling stock pantographs was established. The calculation for determination the current boost point and the algorithm of the lower limit system of the voltage level pantographs EMP were presented. The dependences of changing energy loss in the contact network from a predetermined voltage level were received. According to the results of calculations; the nomograms were constructed for determining energy-optimal dispatching levels of voltage in the contact network.

Keywords: electric traction; direct current; voltage regulation; boost point.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Lezhnyuk P. D.*

© Косарев Е. М., 2015

М. Б. КУРГАН, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА, С. Ю. БАЙДАК (ДНУЗТ)

Кафедра «Проектування і будівництво доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-48, ел. пошта: kunibor@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-8182-7709

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ОДНОКОЛІЙНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ

Аналіз стану проблеми

В найближчій перспективі Укрзалізниця планує реалізовувати проекти з електрифікації ділянок залізниць, що ведуть до портів Одеси й Миколаєва, а також до кордонів із Польщею та Білоруссю.

В республіці Білорусь ведуться роботи з електрифікації залізниць з перспективним виходом на територію України за декількома напрямками: Гомель – Чернігів і Жлобин – Калинковичі – Коростень. В свою чергу в Україні зараз допрацьовується документація щодо електрифікації напрямків на Білорусь і Польщу: Бердичів – Коростень – Словечно – Держкордон, Чернігів – Горностаївка – Держкордон (рис. 1), Ковель – Ізов – Держкордон (рис. 2).



Рис. 1. Вихід з Білорусі в Україну (електрична тяга – Гомель–Жлобин–Бобруйск)

Таким чином, це буде перший пострадянський досвід електрифікації через нові кордони.

Згідно з проектом, планується перевести на електротягу магістральну ділянку Львівської залізниці Ковель – Володимир-Волинський – Ізов (див. рис. 2). Крім того, проект лежить в контексті розвитку маршруту «Вікінг» за рахунок створення додаткового напрямку Польща – Чорне море по електрифікованому коридору.



Рис. 2. Вихід в Польщу (Ковель – Ізов – Держкордон)

Для Укрзалізниці електрифікація ділянки Чернігів – Гомель дуже важлива, бо це дозволить завершити електрифікацію Чернігівського вузла й продовжити тягове плече для електровозів від Києва до Гомеля на напрямку Мінськ – Жлобин – Гомель – Чернігів – Ніжин (рис. 3).



Рис. 3. Вихід з Білорусі на Бахмач і Коростень

На напрямку з Білорусі на південь і схід України (див. рис. 3) значний рух вантажних поїздів, але рішення щодо електрифікації ділянки Гомель – Бахмач поки що не прийнято.

Також є проект електрифікації ділянки Жлобин – Калинковичі – Коростень і домовленість з литовською залізницею про з'єднання електрифікованої мережі Білорусі з електрифікованою ділянкою Литви в районі Вільнюса (рис. 4)

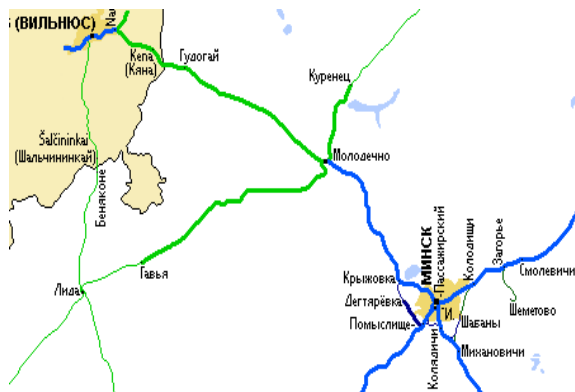


Рис. 4. Вихід з Білорусі до Литви

У 2015 році планується завершити електрифікацію трьох ділянок: Гомель – Жлобин, Жлобин – Калинковичі і Молодечно – Гудогай –Держкордон. Таким чином, буде створено єдиний міжнародний електрифікований коридор з України через Білорусь в країни Балтії.

На сьогодні пропускна спроможність одноколіїних ділянок залізниць з тепловозною тягою не задовольняє вимогам щодо обсягів перевезень, швидкості руху, екології та економії енергоресурсів.

У теперішній час від Києва до Гомеля (334 км) маршрутна швидкість складає 51,5 км/год. Середня швидкість руху поїздів Київ – Мінськ і Київ–Санкт-Петербург між станціями наведена на гістограмі (рис. 5).

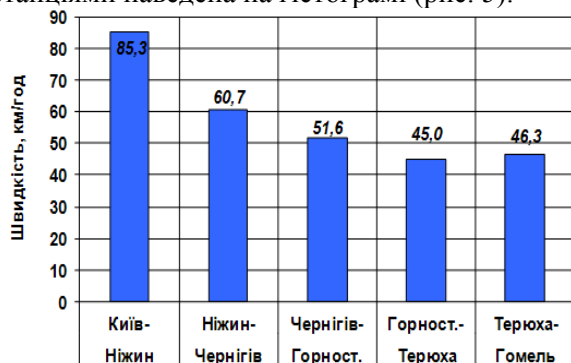


Рис. 5. Гістограма розподілу швидкості руху по ділянках

Як видно з рис. 1, 3 і 5, технічне оснащення ділянок залізниць суттєво впливає на експлуатаційні показники. Так, ділянка Київ-Ніжин двоколіїна, електрифікована, Ніжин-Чернігів – одноколіїна, електрифікована, інші три ділянки – одноколіїні, на тепловозній тязі. На напрямку Чернігів – Горностаївка – Терюха – Гомель, середня швидкість руху в 1,2-1,3 рази нижче, ніж на одноколіїній електрифікованій ділянці і в 1,6-1,9 рази нижче, ніж на двоколіїній.

Мета роботи

Представляється доцільним дослідити, наскільки покращуються тягово-енергетичні по-

казники при заміні тепловозної тяги на електричну на ділянках, що характеризуються різними умовами експлуатації, різною крутизною ухилів і обрисом поздовжнього профілю.

Методика дослідження

Методика базується на аналізі потужностей локомотивів і сталої швидкості, що реалізується поїздом на різних ділянках поздовжнього профілю. Проведемо співставлення тягових характеристик тепловоза, наприклад, 2ТЕ116 і електровоза змінного струму 2ЕЛ5 як це рекомендовано в роботі [1], (рис. 6).

Швидкість руху поїзда на достатньої довжини елементі поздовжнього профілю залежить від типу локомотива, маси поїзда і загального опору руху. Так як тягові характеристики тепловоза і електровоза (див. рис. 6) суттєво відрізняються в діапазоні 30...70 км/год, то й швидкості руху на однакових елементах поздовжнього профілю будуть різні. Для виявлення сталої швидкості на різних за крутизною елементах профілю скористаємося сполученими графіками $F_k(V)$ – тягова характеристика локомотива і $W(V)$ – крива загального опору руху.

Загальний опір руху складається з основного опору руху W_o , опору від ухилу W_i і опору від кривизни колії W_r [2, 3]: $W = W_o + W_i + W_r$.

Абсциса точки перетину графіків $F_k(V)$ і $W(V)$ відповідає сталій швидкості руху поїзда на ухилі i .

Відомо, що переваги електричної тяги найбільше проявляються на крутих затяжних підйомах. Значення сталої швидкості для різних ухилів наведені в табл. 1

З аналізу рис. 6 і табл. 1 випливає, що вантажний поїзд однакової маси (для прикладу взято 4000 т) з локомотивом 2ЕЛ5 рухається із швидкістю в 1,9 і 2 рази швидше на ухилах відповідно 8 і 10‰ у порівнянні з тепловозною тягою.

Для визначення факторів, які впливають на енергетичні витрати, при тепловозній і електричній тязі, розглянемо рівняння руху поїзда

$$F_k = m a + W_o + W_i + W_r. \quad (1)$$

При відомій силі тязі, що витрачається на тягу поїздів, можна визначити механічну роботу локомотива на ділянці довжиною L :

$$R_m = \int F_k dS = \sum F_k \cdot \Delta S, \quad (2)$$

де l – частина ділянки L , на якій сила тяги локомотива $F_k > 0$.

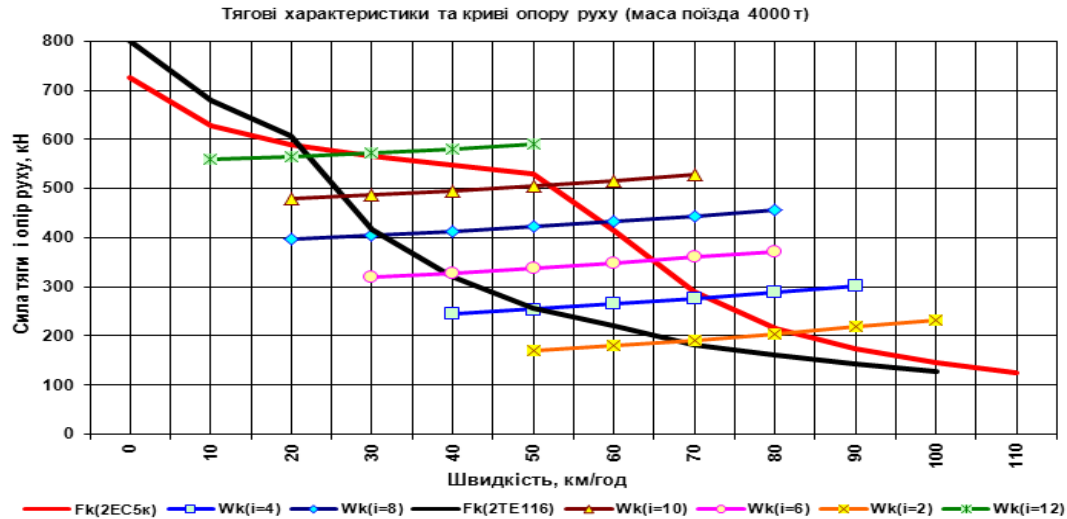


Рис. 6. Тягові характеристики і криві повного опору руху

Таблиця 1

Стала швидкість вантажних поїздів на крутих підйомах

Ухил, ‰	Стала швидкість, км/год		Зростання швидкості, разів 2ТЕ116 - 2ЕЛ5
	2ТЕ116	2ЕЛ5	
2	69	82	1,2
4	51	72	1,4
6	40	65	1,6
8	31	59	1,9
10	26	53	2,0
12	22	30	1,4

До ділянок l відносяться ділянки розгону, а також ділянки, на яких поїзд рухається з постійною швидкістю на підйомах, площадках і спусках, якщо сила додаткового опору руху від ухилу W_i і кривизни колії W_r не перевищує величини основного опору руху, тобто $(W_i + W_r) < W_o$. Основний опір руху має місце при русі поїзда по прямій і горизонтальній колії, і, в свою чергу, залежить від тертя кочення і ковзання коліс по рейкам, втрат живої сили від ударів і коливань, тобто в кінцевому підсумку – від стану рухомого складу і колії.

Для економічної оцінки витрат енергоресурсів при тепловозній і електричній тязі можна визначити витрати дизельного палива G (кг) і електроенергії A (кВт-год) через механічну роботу локомотива R_m (ткм) як $G = k_g \cdot R_m$ – тепловозна тяга; $A = k_a \cdot R_m$ – електрична тяга.

Такі залежності впливають з наступного. Відомо, що механічна робота визначається через дотичну силу тяги і пройдений шлях (2). Записавши пройдений шлях через швидкість V і час Δt , отримаємо $R_m = \sum F_k \cdot V \cdot \Delta t$. Витрати палива визначаються через одиничні витрати g і час Δt :

$$G = \int g dt = \sum g \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Аналогічно, витрати електроенергії можна визначити через напругу U , струм I і час Δt :

$$A = \int U \cdot I \cdot dt = \sum U \cdot I \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Для визначення коефіцієнтів k_g і k_a необхідно знайти співвідношення між g , $U \cdot I$ і $F_k \cdot V$. В роботі [4], запропоновані апроксимуючі залежності:

а) для тепловозів:

$$k_g = 0,00002V^2 - 0,003V + 0,92; \quad (5)$$

б) для електровозів змінного струму:

$$k_a = 0,0002V^2 - 0,033V + 4,97. \quad (6)$$

При виконанні тягових розрахунків на кожному кроці визначається середня швидкість руху. По середній швидкості розраховуються значення коефіцієнтів k_g або k_a , а по зміні механічної роботи визначається приріст витрат палива або електроенергії.

В роботі досліджено питання зміни енергоємності вантажного поїзда, що рухається на різних за крутизною підйомів ділянках залізниці. Для порівнянності результатів були прийняті маси вантажного поїзда від 3000 т до 4500 т, керівний ухил змінювався від 8 до 12‰.

Розрахунки виконувались для різних за обрисом еталонних ділянок (профіль у вигляді «горба», «ями» і «підйом-спуск»). Найбільший ефект від впровадження електричної тяги досягається в третьому випадку. Так як найбільша різниця сталої швидкості має місце при ухилі 10‰ (див. табл. 1), то результати тягово-енергетичних розрахунків наведено для профілю у вигляді зтяжного підйому з таким ухилом (табл. 2).

Різниця у вартості витрат енергоресурсів на тягу поїздів складає 28-31% на користь електричної тяги (в залежності від співвідношення вартості 1 тонни палива і 1000 кВт-год електроенергії) (рис. 7, 8).

Так як середня швидкість руху поїздів на зтяжному підйомі при електричній тязі в 1,7-2,0 рази вища ніж при тепловозній, то час руху скорочується (рис. 9), а пропускна спроможність одноколіїної ділянки зростає.

Сказане можна проілюструвати таким прикладом. Пропускна спроможність одноколіїних перегонів у разі парного непакетного графіка визначається за формулою

$$n_n = \frac{(1440 - t_{mex}) \alpha_n}{t' + t'' + \tau_1 + \tau_2} = \frac{(1440 - t_{mex}) \alpha_n}{T_n}, \quad (7)$$

де t', t'' - час руху по обмежуючому перегону відповідно в непарному і парному напрямках з урахуванням розгонів і сповільнень, хв;

τ_1, τ_2 - відповідно станційні інтервали на станціях, що обмежують перегін [5].

При довжині перегону l_n період графіка руху поїзда буде $T_n = (t_o' + t_o'') \cdot l_n + \tau_1 + \tau_2$. При

$l_n = 15$ км, масі поїзда $Q = 4000$ т і t_o', t_o'' (за даними табл. 2) отримуємо $T_n = 58$ хв. при тепловозній тязі і $T_n = 39$ хв. – при електричній. За формулою (7) пропускна спроможність складає відповідно 21 і 31 пар поїздів на добу. Отже, в розглянутому прикладі впровадження електричної тяги підвищує пропускну спроможність на 10 пар поїздів на добу.

Таблиця 2

Тягово-енергетичні розрахунки на 1 поїздо-км для профілю «підйом-спуск»

Напрямок руху	V_{max} , км/год	$V_{сер}$, км/год	Витрати енергоносіїв, кг (кВт·год)	Мех. робота, ткм	Робота гальмівних сил, ткм	Час руху, хв
2ТЕ116, Q=3000 т						
непарн.	51	34	28,0	36,4	1,0	1,76
парний	80	73	1,2	1,5	21,9	0,82
2ЕЛ15, Q=3000 т						
непарн.	73	61	141,5	38,2	1,6	0,98
парний	80	74	6,8	1,7	21,6	0,81
2ТЕ116, Q=3500 т						
непарн.	47	30	32,1	41,5	1,1	2,00
парний	80	73	1,2	1,6	25,2	0,82
2ЕЛ15, Q=3500 т						
непарн.	70	58	163,1	43,7	1,9	1,04
парний	80	73	7,5	1,9	24,9	0,82
2ТЕ116, Q=4000 т						
непарн.	45	27	36,2	46,6	1,2	2,26
парний	80	73	1,4	1,8	28,4	0,83
2ЕЛ15, Q=4000 т						
непарн.	67	55	185,0	49,3	1,6	1,09
парний	80	73	8,2	2,1	28,2	0,82
2ТЕ116, Q=4500 т						
непарн.	40	23	40,4	51,7	0,8	2,62
парний	80	72	1,4	1,9	31,7	0,83
2ЕЛ15, Q=4500 т						
непарн.	61	44	208,5	53,4	1,8	1,36
парний	80	73	8,8	2,3	31,4	0,82

© Курган М. Б. та ін., 2015

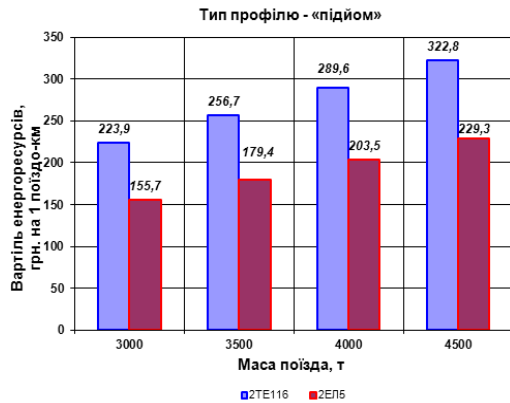


Рис. 7. Вартість енергоресурсів (підйом)

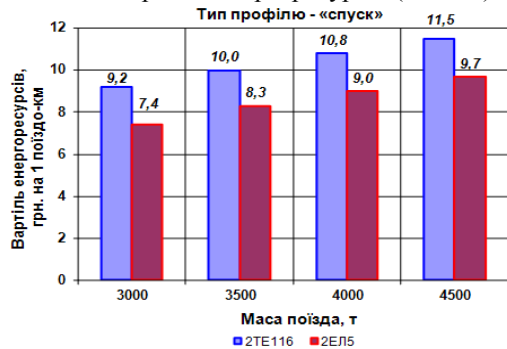


Рис. 8. Вартість енергоресурсів (спуск)

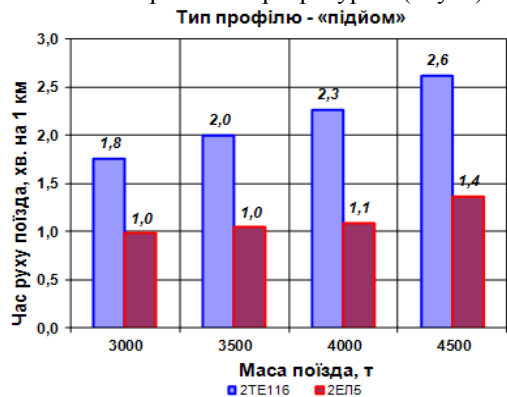


Рис. 9. Час руху вантажного поїзда віднесений до 1 км

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Курган М. Б. Эффективность внедрения новых типов электровозов [Текст] / М. Б. Курган, Н. П. Хмелевська, С. Ю. Байдак / Электрификация транспорта – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – Вип. 8. – С. 93-98.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
3. Гребенюк П. Т. Тяговые расчеты: Справочник [Текст] / П. Т. Гребенюк, Долганов А. Н., Скворцова А. И. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
4. Корженевич И. П. Оценка расхода топлива или электроэнергии через механическую работу локомотива [Текст] // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – Вип. 29. – С. 88-90.
5. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України [Текст]: (ЦД/0036). – К., - 2002. – 376 с.

© Курган М. Б. та ін., 2015

Висновки

Розрахунки пропускної спроможності виконані для перегонів у вигляді «ями», «горба» і «підйому-спуску» підтверджують ефективність впровадження електричної тяги незалежно від обрисів профілю, якщо мають місце круті підйоми з ухилами 8-12 % на яких вантажні поїзди рухаються зі сталою швидкістю.

2. За рахунок збільшення маси вантажних поїздів при впровадженні нових типів електро-возів і зростання середньої швидкості руху в 1,5-2,0 рази ефективність досягається також за рахунок скорочення парку електро-возів у порівнянні з тепловозною тягою.

3. Збільшення швидкості руху на крутих підйомах у порівнянні з тепловозною тягою призводить до скорочення часу руху по перегонах, що має велике значення для підвищення пропускної спроможності, перш за все, однокільних ділянок.

4. При впровадженні електро-возів нового покоління слід також враховувати, що їхня потужність не використовується в повній мірі із-за обмеження норми маси довжиною прийнятно-відправних колій, а швидкості руху часто обмежуються станом колійного господарства перегонів і станцій [6, 7]. Отже, на напрямках (рис. 1-3) паралельно електрифікації необхідно виконувати роботи з модернізації залізничної колії, перевлаштування плану лінії для усунення обмежень швидкості за параметрами кривих.

Надійшла до друку 15.06.2015.

REFERENCES

1. Kurhan M. B., Khmelevska N. P., Baidak S. Yu. Efektyvnist' vprovadzhennya novykh typiv elektrovoziv. Scientific journal Electrification of transport. Dnipropetrovskyy Natsional'nyy Universytet Zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana, 2014, issue 8, pp. 93-98.
2. Pravila tyagovyih raschetov dlya poezdnoy raboty. Moscow, Transport, 1985, 287 p.
3. Grebenyuk P. T. Tyagovyye raschety: Spravochnik. Moscow, Transport, 1987, 272 p.
4. Korzhenevich I. P. Otsenka raskhoda toplyva uly elektroenerhiy cherez mekhanicheskuyu rabotu lokomotyva. Visnyk Dnipropetrovskoho Natsionalnoho Universytetu Zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana, 2009, issue 29, pp. 88-90.
5. Instruktsiya z rozrakhunku nayavnoyi propusknoyi spromozhnosti zaliznyts' Ukrayiny. Kyiv,

6. Корженевич І. П. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів [Текст] / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Ю. С. Бараш, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – Вип. 20. – С. 233-239.

7. Проведення досліджень та оцінка економічної ефективності усунення обмеження швидкості за параметрами і станом залізничної колії: Звіт про НДР [Текст] / Дніпропетр. нац. ун-тет залізн. трансп.; Договір №78/2011-Цтех-142/2011-ЦЮ від 12.09.2011 р. Номер держреєстрації 0111U008909. Д., 2011. – 64 с.

2002, 376 p.

6. Korzhenevich I. P., Kurgan M. B., Barash Yu. S., Kurgan D. M. Vpliv pidvischennya shvidkosti ruhu poyizdiv na vitrati energoresursiv. Visnyk Dnipropetrovskoho Natsionalnoho Universytetu Zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana, 2008, issue 20, pp. 233-239.

7. Provedennya doslidzhen' ta otsinka ekonomichnoyi efektyvnosti usunennya obmezheniya shvydkosti za parametryamy i stanom zaliznychnoyi kolyi. Dnipropetrovskyy Natsional'nyy Universytet Zaliznychnoho transportu imeni imeni akademika V. Lazariana, 2011, 64 p.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

В даній статті на прикладі залізничних напрямків з тепловозною тягою, що зв'язують Україну з Білоруссю й Польщею, досліджується ефективність їх електрифікації для підвищення пропускної спроможності. Для досягнення мети дослідження проаналізовано ряд проектів, згідно яких планується електрифікація існуючих одноколіїних залізниць. Показано, як технічне оснащення ділянок залізниць впливає на експлуатаційні показники. За результатами розрахунків зроблено висновок щодо впливу обрису поздовжнього профілю, величини ухилів, типу електровозів і маси поїздів на ефективність електрифікації одноколіїних залізниць.

Ключові слова: електрифікація; енергоємність; модернізація колії; обмеження швидкості; змінний струм.

УДК 621.331.3

Н. Б. КУРГАН, Н. П. ХМЕЛЕВСКАЯ, С. Ю. БАЙДАК (ДНУЖТ)

Кафедра «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-48, эл. почта kunibor@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-8182-7709

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ОДНОПУТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

В данной статье на примере железнодорожных направлений с тепловозной тягой, связывающие Украину с Белоруссией и Польшей, исследуется эффективность их электрификации для повышения пропускной способности. Для достижения цели исследования проанализирован ряд проектов, по которым планируется электрификация существующих однопутных железных дорог. Показано, что эксплуатационные показатели зависят от технического оснащения железной дороги. По результатам расчетов сделан вывод о влиянии очертания продольного профиля, величины уклонов, типов электровозов и массы поездов на эффективность электрификации однопутных железных дорог.

Ключевые слова: электрификация; энергоёмкость; модернизация пути; ограничения скорости; переменный ток; эффективность.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 621.331.3

M. B. KURHAN, N. P. KHMELEVSKA, S. YU. BAIDAK (DNURT)

Department of Engineering And Construction Of Roads, Dnipropetrovsk National University Of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-48, e-mail kunibor@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-8182-7709

RESEARCH EFFICIENCY ELECTRIFICATION SINGLE TRACK RAILWAY TO INCREASE CAPACITY

In this article, the example of the railway routes with diesel traction connecting Ukraine, Belarus and Poland, studied the effectiveness of their electrification. To achieve the objectives of the study analyzed a number of projects, which are planned for the electrification of the existing single-track railways. It is shown that the performance indicators depend on the technical equipment of the railway. The study concluded that the effect of the contour of the longitudinal profile, slope, type and weight of trains affect the efficiency of a single-track railway electrification.

Keywords: electrification; energy consumption; modernization of the way; the speed limit; alternating current; effectiveness.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

© Курган М. Б. та ін., 2015

Т. М. МІЩЕНКО (ДНУЗТ)

Кафедра «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. (099)136-96-25, ел. пошта: mishchenko_tn@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6336-7350

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПРИ ПАКЕТНОМУ РУСІ ШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ

Постановка задачі

Одним з основних напрямів реалізації Транспортної стратегії України [1] і зокрема Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року [2] є «впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів, передусім денних», шляхом підвищення швидкості їх руху до 160...200 км/год, а також підвищення швидкості руху вантажних поїздів до 100...120 км/год. Оскільки побудова спеціальних магістралей для такої мети являється заходом дорогим і тривалим тому організацію швидкісного руху в Україні передбачається здійснювати на реконструйованих залізничних лініях. При цьому, на першому етапі планується суміщати рух швидкісних пакетів пасажирських поїздів (з $V_{\max} = 200$ км/год) зі «звичайним» пасажирським (з $V_{\max} = 160$ км/год) і із спеціалізованим вантажним (з $V_{\max} = 120$ км/год), а також зі змішаним вантажним (з $V_{\max} = 100$ км/год) рухами поїздів. Згущення пасажирських поїздів в пакетах, що рухаються по фідерній зоні, суттєво впливає на такі важливі критерії розрахунку системи тягового електропостачання (СТЕ) як [3, 4]: рівень напруги на струмоприймачі електрорухомого складу (ЕРС); струмове навантаження тягової мережі, яке дозволяє оцінити допустимий нагрів проводів контактної мережі і встановлену потужність електроустаткування тягових підстанцій (ТП); втрати потужності в тяговій мережі. Для відповіді на питання про максимальні та діючі значення цих величин необхідні їх дослідження в умовах швидкісного руху. Однак, на сьогодні на залізницях України поки що практично такий рух відсутній, а існують «звичайний» пасажирський (при $V_{\max} = 160$ км/год) і змішаний вантажний (з $V_{\max} = 100$ км/год) рухи, тому експериментальні дослідження неможливі. Залишається практично лише один метод вивчення електромагнітних процесів при швидкісному (а тим більше і при високошвидкісному) русі поїздів – метод математичного моделювання. Такої ж

думки притримуються і закордонні автори, зокрема, робіт [3, 5].

На сьогодні найбільш поширеними методами моделювання процесів в системах електричного транспорту є математичне та імітаційне. Математичне моделювання, яке базується на формалізованому описанні процесів у вигляді систем математичних рівнянь (складених за законами Кірхгофа), передбачає знання повних схем заміщення СТЕ і ЕРС. В цьому питанні «вузьким» місцем є отримання повної схем заміщення ЕРС. Справа в тому, що аналіз схемотехнічних рішень частково вже створених і перспективних (для швидкісного руху поїздів) ЕРС свідчить [6-8] про суттєву складність навіть їх структурних схем, не говорячи вже про розрахункові схеми заміщення та алгоритм їх роботи навіть одного поїзда на фідерній зоні. А при організації швидкісного руху на ділянці між тяговими підстанціями рухаються 3...4 і більше поїздів, а це означає необхідність врахування схем заміщення 3...4 і більше електровозів в математичній моделі системи.

Зазначене вище дозволяє стверджувати, що практично неможливо побудувати точну математичну модель такої складної нелінійної динамічної потужної системи як СТЕ тільки, як це зараз здійснюється, на основі теоретичного аналізу фізичних процесів, що протікають в пристроях чи підсистемах цієї системи з наступним використанням законів і методів теоретичної електротехніки. Якраз зазначене практично і гальмує математичне моделювання, а отже і прогнозування, процесів в перспективних СТЕ, особливо тих, що модернізуються для впровадження швидкісного і високошвидкісного руху поїздів. На нашу думку, розв'язання цієї проблеми можливо створенням імітаційних моделей всієї СТЕ, в якій модель ЕРС формують методами ідентифікації [8, 9]. Такий підхід цілком раціональний, оскільки математичне моделювання було більш застосованим в ті роки, коли не було потужної обчислювальної техніки і потрібного програмного забезпечення. Сучасний розвиток комп'ютерних технологій і досконалого програ-

© Міщенко Т. М., 2015

много забезпечення обумовлюють більш доцільним застосування імітаційного моделювання.

Аналіз останніх публікацій з проблеми

Наукових публікацій з імітаційного моделювання електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання велика кількість, зокрема в Україні в останні роки це [10-14]. Однак вони стосуються руху поїздів при звичайних швидкостях (або без врахування ЕРС). Виключення складають лише роботи [3-5]. Проте в роботах [4, 5] не подано метод моделювання, не відома його процедура і результати подані дуже коротко. Робота [3], по-перше, виконана не на залізницях України (в Росії), по-друге, ЕРС заміщено ідеальним джерелом струму і, нарешті, автор не моделював процеси, а «просто» розрахував їх методом планування багатофакторних експериментів і регресійного аналізу. Тому ця робота може слугувати лише в орієнтовно методичному плані й в ніякому разі її результати не можуть бути використані для аналізу і впровадження швидкісного руху на залізницях України.

В роботах [15, 16] розрахунки, тим більше моделювання, процесів в тяговій мережі СТЕ не приведені, а в публікації [17] лише подана інформація, що в ВНДІЗТ (Росія) розроблено комп'ютерну модель процесів струморозподілення в контактній мережі, за допомогою якої можлива оптимізація її конструкції на стадії проектування чи при модернізації; власне модель і результати моделювання не приведені.

Мета роботи

Метою цієї роботи є розробка (в середовищі Matlab (Simulink)) імітаційної моделі електромагнітних процесів, що протікають в тяговій мережі змінного струму, при пакетному русі швидкісних поїздів, а також її застосування для визначення напруги на струмоприймачі електровоза, його струму, а також фідерного струму і втрат потужності в тяговій мережі при різній кількості поїздів в пакеті, інтервалі часу попутного прямування та міжпідстанційної відстані.

Умови формування моделей

Система тягового електропостачання. Багатьма спеціалістами в області електричного транспорту, зокрема в [6, 7, 15, 17-19], вважається, що існуюча система тягового електропостачання постійної напруги 3,3 кВ при певній її модернізації шляхом підсилення дозволить організувати швидкісний рух поїздів з V_{\max} до 200 км/год. Підсилення цієї системи доцільно, насамперед,

підвищенням напруги в тяговій мережі на першому етапі до 6 кВ, а потім – до 12 кВ за рахунок переходу від існуючої централізованої системи живлення тягової мережі до схеми розподіленого живлення від лінії повздовжнього електроживлення певної постійної чи змінної напруги. Однак, все ж світовий досвід показує, що на ділянках з швидкісними поїздами застосовується виключно СЕТ змінного струму 27,5 кВ (особливо з підсилюючими і екрануючими проводами), яка має дуже широку можливість маневру енергетичної ефективності в залежності від розмірів руху поїздів [2020]. Тому в цій роботі при моделюванні використано СЕТ змінного струму 27,5 кВ, 50 Гц. При цьому в якості моделі тягової підстанції (ТП) прийнято реальне джерело синусоїдної е.р.с. з внутрішнім активним опором $R_{\text{ТП}} = 0,176 \text{ Ом}$ та індуктивністю $L_{\text{ТП}} = 0,00177 \text{ Гн}$. Міжпідстанційна ділянка одноколійна з лінійною однорідною контактною підвіскою ПБСМ-95+МФ-100 і рейками типу Р65; питомі параметри тягової мережі:

$R_{\text{ТМ}} = 0,112 \text{ Ом/км}$, $L_{\text{ТМ}} = 0,848 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$ [21, 22]. Схема живлення – двостороння. Вихідні напруги на шинах ТП прийняті однаковими.

Електрорухомий склад

На сьогодні на залізницях України існуючі «звичайний» пасажирський і змішаний вантажний рух поїздів забезпечуються електровозами типів: ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ЧС, ДЕ1, ДС3, ВЛ60, ВЛ80 та ін. Схемотехнічно зазначені серії електровозів відносно не складні. І тому при математичному моделюванні електромагнітних і електроенергетичних процесів зображують їх повні схеми заміщення (з наступним складанням системи рівнянь). Однак за своїми схемотехнікою і параметрами ці типи ЕРС вже не можуть забезпечити необхідне на сьогодні підвищення пропускної і провізної здатностей електричних залізниць, тим більше при впровадженні швидкісних і високошвидкісних перевезень [6, 7, 15-17]; необхідна суттєва модернізація або побудова нових типів. При цьому всі спеціалісти вважають, що для виконання вищезазначеного потрібно щоб тяговий привод перспективних електровозів (і електропоїздів) для швидкісного і високошвидкісного рухів будувався на безколекторних тягових двигунах (ТЕД) і найчастіше – на основі асинхронних короткозамкнених ТЕД [6, 7, 23-25]. При цьому, ці ТЕД повинні живитись (через певні тягові перетворювачі) від контактної мережі як постійної, так і змінної напруги. Тим самим з'являється необхідність створення двосистемних типів ЕРС.

В роботі при моделюванні прийнято, що рух швидкісних поїздів здійснюється електровозом типу ЕД 4, який заплановано виготовляти на базі модернізованого електровоза ДС 3 і який буде мати максимальну швидкість 200 км/год [26]. Суттєва схемотехнічна складність зазначених вище ЕРС обумовила застосувати в цій роботі ідентифікаційну модель електровоза ЕД 4 у вигляді пасивного двополюсника з послідовним з'єднанням нелінійного (статичного) резистивного елемента R та параметричної індуктивності L [27]. При цьому закономірність зміни L в часі за період прикладеної напруги при діючих значеннях струму навантаження 20; 50; 100 А приведена на рис. 1.

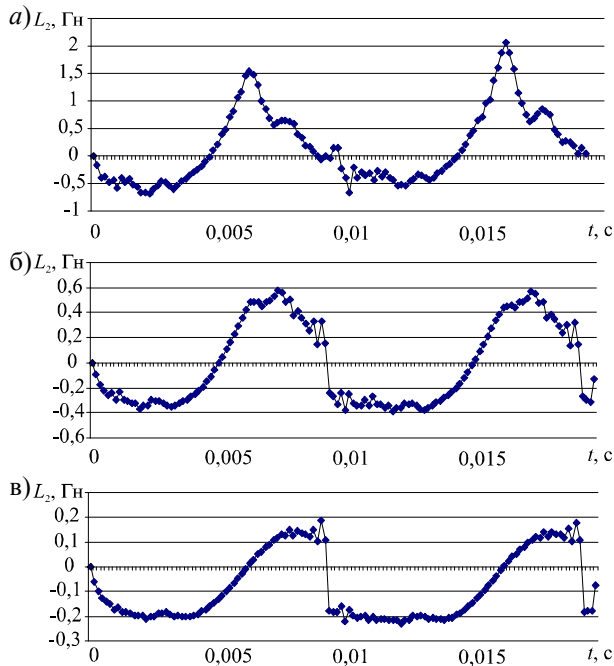


Рис. 1.

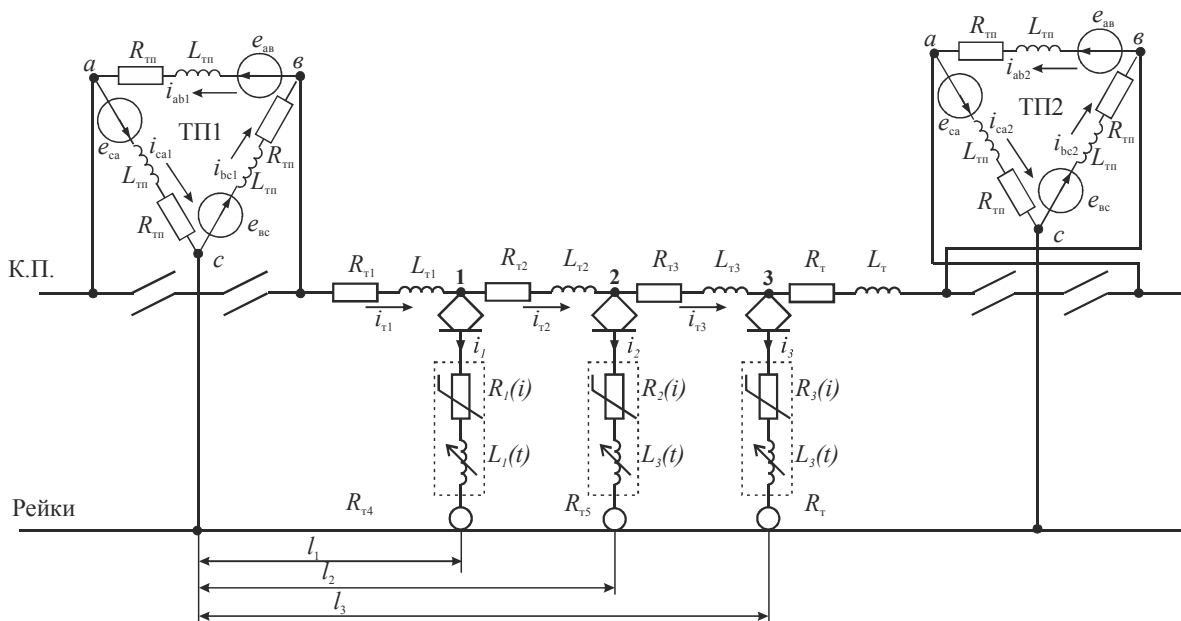


Рис. 2.

При моделюванні використали еквівалентні значення R і L , і вони склали: для електровоза №1 – $R_1 = 133,05$ Ом, $L_1 = 0,077$ Гн; для електровоза №2 – $R_2 = 281,2$ Ом, $L_2 = 0,22$ Гн.

Загальна схема фідерної зони на прикладі трьох поїздів, що рухаються, представлена на рис. 2.

Схеми імітаційного моделювання

На рис. 3-4, в якості прикладу представлено розроблені в цій роботі імітаційні моделі розрахунку електричних процесів в системі тягового електропостачання при швидкості руху поїздів 200 км/год.

Взагалі моделювали 6 варіантів миттєвих схем розташування поїздів на фідерній зоні (табл. 1).

Таблиця 1

Номер варіанта	Міжпідстанційна відстань, ℓ , км	Кількість поїздів в пакеті, n	Інтервал часу попутного прямування, Δt , хв.
1	60	3	5
2	60	3	6
3	60	3	7
4	60	4	5
5	80	3	6
6	80	4	7

Рух поїздів в пакеті починається в точці (в місці), яка розташована на відстані 1 км від ТП № 1. Визначали напругу на струмоприймачах електровозів, їх струм, а також струм і втрати потужності на ділянках тягової мережі.

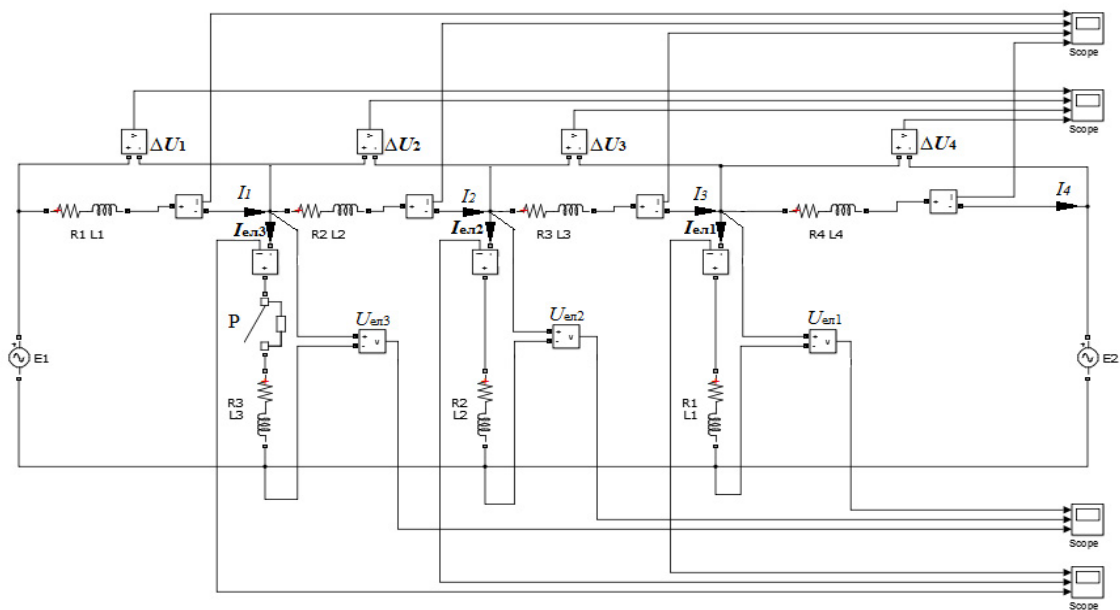


Рис. 3.

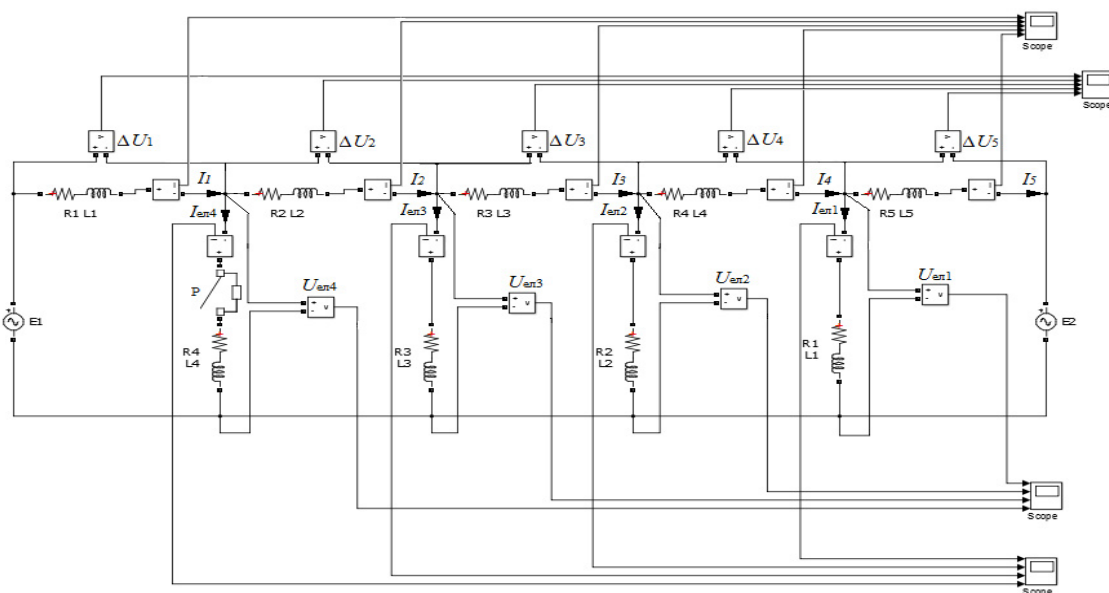


Рис. 4.

Оскільки параметри тягової мережі прийняті лінійними, а підстанційна живляча напруга являється синусоїдною, тому всі розрахункові миттєві величини (напруги, струми і т. д.) отримані синусоїдними, що й мається на увазі у подальшому аналізі, а приведені результати подані для діючих значень. При цьому перехідний процес на осцилограмах розрахункових величин при «вмиканні» чергового поїзда не помітний оскільки він короткочасний (не більше 1,5 мс) і тому спостерігається зразу ж установлений режим. Це цілком закономірно і пояснюється великим значенням вхідних активних опорів електровозів.

Проаналізуємо результати моделювання.

Результати моделювання та їх аналіз

З аналізу даного моделювання випливає, що при пакетному русі поїздів всі основні величини мають особливий екстремальний (мінімум чи максимум) характер зміни; розглянемо ці зміни.

Рівень напруги на струмоприймачі. Одним із основних, дуже важливих, критеріїв розрахунку пристроїв СТЕ електрифікованих залізничних ліній зі швидкісним рухом являється напруга U на струмоприймачі електрорухомого складу. Це обумовлено безпосередньою залежністю швидкості руху V від зазначеної напруги. Зокрема встановлено [28], що для СТЕ змінного струму при русі зі $V = 200$ км/год зниження середньої

V_{cp} (при $U < U_{ном}$) швидкості відносно усталеного її значення $V_{уст}$ (при $U > U_{ном}$) пропорційне максимальному відхиленню напруги ΔU_{max} відносно $U_{ном}$, тобто:

$$\Delta V = V_{уст} - V_{cp} = \frac{8}{3} \Delta U_{max}, \quad (1)$$

$$\text{де } \Delta U_{max} = \Delta U_{cp} \cdot C_{\Delta U}^{-1}, \quad (2)$$

$$\text{а } \Delta U_{cp} = U_{ном} - U_{cp}, \quad (3)$$

де U_{cp} – середня величина діючого значення напруги на струмоприймачі ЕРС при його русі на міжпідстанційній зоні за термін часу проходження одного поїзда чи пакету поїздів;

коефіцієнт $C_{\Delta U} = 0,56 \dots 0,7$ [28].

Величина U_{cp} являє собою відношення середньої потужності, розрахованої для поїзда або групи поїздів в пакеті, до відповідного середнього струму:

$$U_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{ni}} \int_0^{t_{ni}} U_{ni} I_{ni} dt}{\sum_{i=1}^n \int_0^{t_{ni}} I_{ni} dt}, \quad (4)$$

де U_{ni}, I_{ni}, t_{ni} – відповідно напруга на струмоприймачі, струм ЕРС, термін часу руху на міжпідстанційній зоні для i -того поїзда.

Середня напруга U_{cp} представляє собою інформативний характеризуючий параметр, який найбільш правильно відображає якість електроживлення високошвидкісних поїздів. І тому СТЕ в період пропуску зазначених поїздів повинна забезпечувати певний заданий рівень напруги згідно Правил технічної експлуатації (ПТЕ) СТЕ (табл.2).

Таблиця 2

Допустимі значення напруги на струмоприймачі

Швидкість руху, км/год	до 160	161...200	201...250	251...300
Максимальна напруга, кВ	29,0	29,0	29,0	29,0
Мінімальна напруга, кВ	21,0	24,0	24,0	24,0

Зниження напруги нижче мінімального значення неприйнятне оскільки буде, як зазначалось вище, призводити до зниження швидкості й тим самим до порушення графіка руху поїздів.

На рис. 5, а-г за даними моделювання представлені графічні залежності напруги на стру-

моприймачі електровоза $U_{ел}$ від шляху руху 3-х і 4-х поїздних пакетів від ТП1 до ТП2. Цифри кривих залежностей вказують на номер віріанта моделювання (згідно табл. 2), а числа 1 та 2 біля пунктирних ліній-ординат свідчать про номер електровоза з поїздом.

Як випливає із цих рисунків, величина $U_{ел}$ закономірно змінюється і її мінімуми зміщуються в напрямку до ТП2. Зменшення $U_{ел}$ відбувається приблизно до координати шляху руху, яка знаходиться на $\frac{3}{4}$ частини міжпідстанційної зони від ТП1. Далі напруга підвищується за рахунок дії ТП2. Не дивлячись на зменшення, необхідна вимога допустимого значення, щоб $U_{ел}$ було більше 24,0 кВ (табл. 1 при $V = 200$ км/год), виконується: найменше значення $U_{ел}$, що дорівнює 26,7 кВ, має місце при $n=4$ і $\Delta t=5$ хв. При цьому середні значення U_{cp} напруги на струмоприймачі при русі на всій фідерній зоні склали відповідно 26,7 і 26,8 кВ.

Вплив факторів ℓ , Δt і n (табл. 2) на зміну напруги на струмоприймачі такий: збільшення міжпідстанційної відстані ℓ призводить до збільшення $U_{ел}$ (рис. 5, а); така ж сама дія інтервалу часу попутного прямування Δt (рис. 5, а, кр. 3 і рис. 5, б, кр. 2); в той же час зміна кількості поїздів в пакеті практично не впливає на зміну $U_{ел}$ (рис. 5, в).

Виконання вимоги по рівню напруги в розглянутих випадках цілком зрозуміло і пояснюється відносно невеликим значенням питомої потужності навантаження на фідерну зону, яка склала 0,21 МВА/км при $\Delta t=5$ хв, та невисокою швидкістю руху (200 км/год), в той час як, згідно [18], максимальна питома потужність на лінії може досягати 1,3...1,4 МВА/км (при $V = 300$ км/год і $\Delta t=3 \dots 4$ хв.).

Зміна фідерного струму. Фідерний струм I_{ϕ} має імпульсний характер з максимумом ~ 340 А при $n=4$ і який розташовується в середніх міжпоїздних ділянках фідерної зони (рис. 6, а-г). При зменшенні кількості поїздів до $n=3$ значення I_{ϕ} , незалежно від інтервалу прямування Δt , не перевищує 235 А.

Зі збільшенням міжпідстанційної відстані (рис. 6, а) і кількості поїздів в пакеті (рис. 6, в) фідерний струм зростає. В той же час зростання I_{ϕ} має місце при зменшенні інтервалу часу попутного прямування (рис. 6, а кр.3 і рис. 6, б, кр. 2).

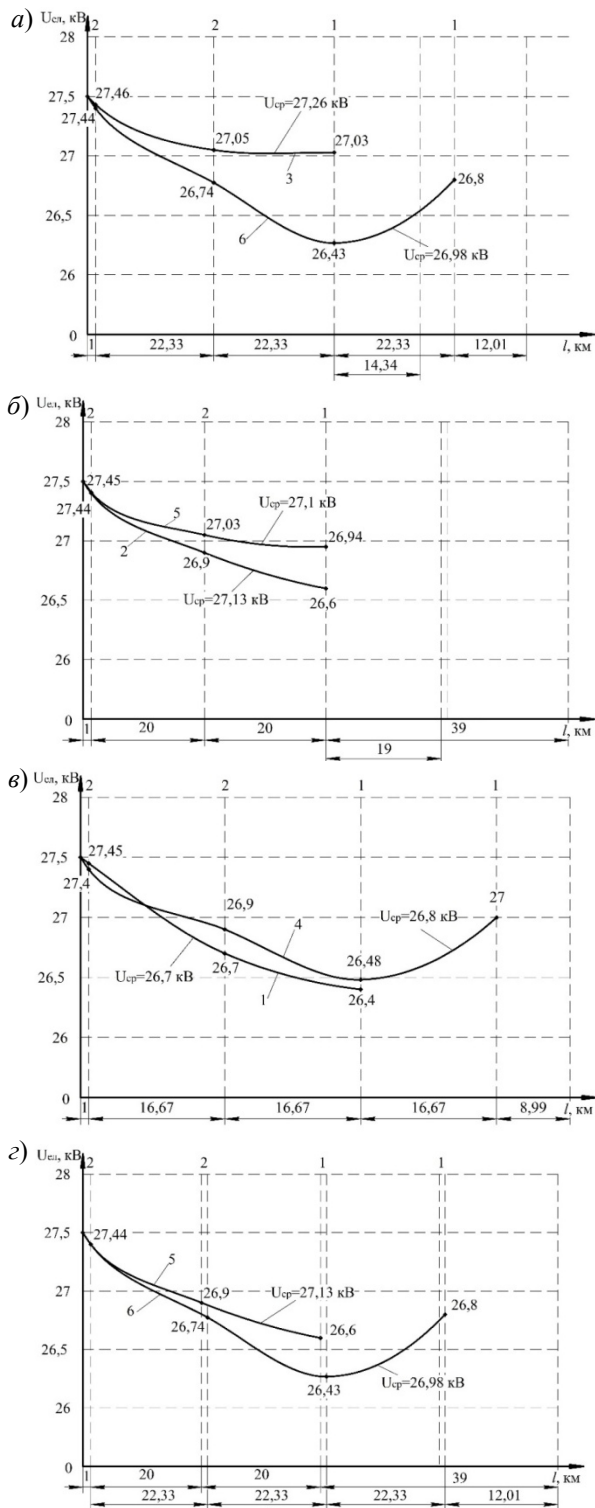


Рис. 5.

Струм електровозів. На відміну від існуючих методик розрахунку параметрів системи тягового електропостачання, в яких струм електровозів задавався за тяговими розрахунками, в цій роботі задавали параметри (R і L) власне електровоза (електровоз №1 і №2), а його тяговий струм розраховувався при моделюванні (рис. 7).

Втрати потужності в тяговій мережі. Збільшення інтервалу попутного прямування поїздів

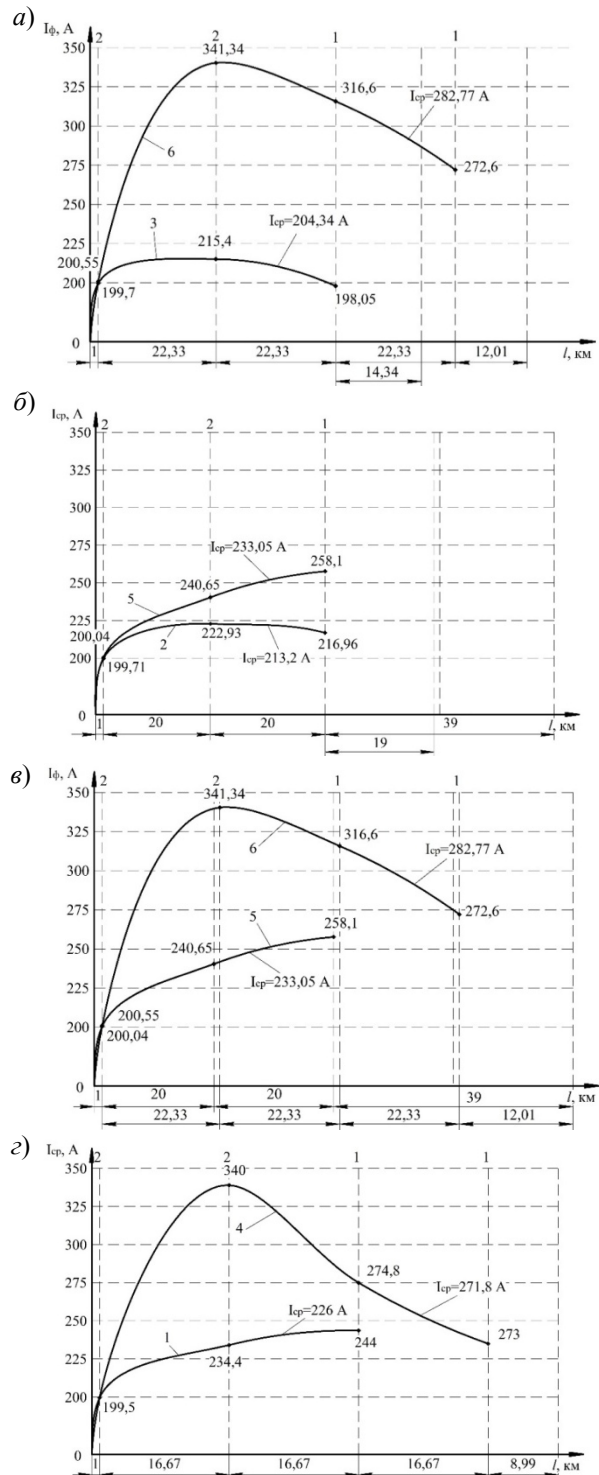


Рис. 6. Залежність струму на ділянках від шляху руху поїздних пакетів

в їх пакеті з 5 до 7 хвилин (при $n=3$) призводить до зменшення втрат потужності ΔP в проводах тягової мережі на 26% (табл. 3). В той же час, збільшення кількості поїздів в пакеті (на 1 поїзд) призводить до підвищення ΔP в 1,8 рази. Останнє повинно враховуватися в складі технологічних втрат, які входять, в так звані, умовні втрати, що визначаються різницею показів електричних лічильників на тяговій підстанції і на електрорухомому складі.

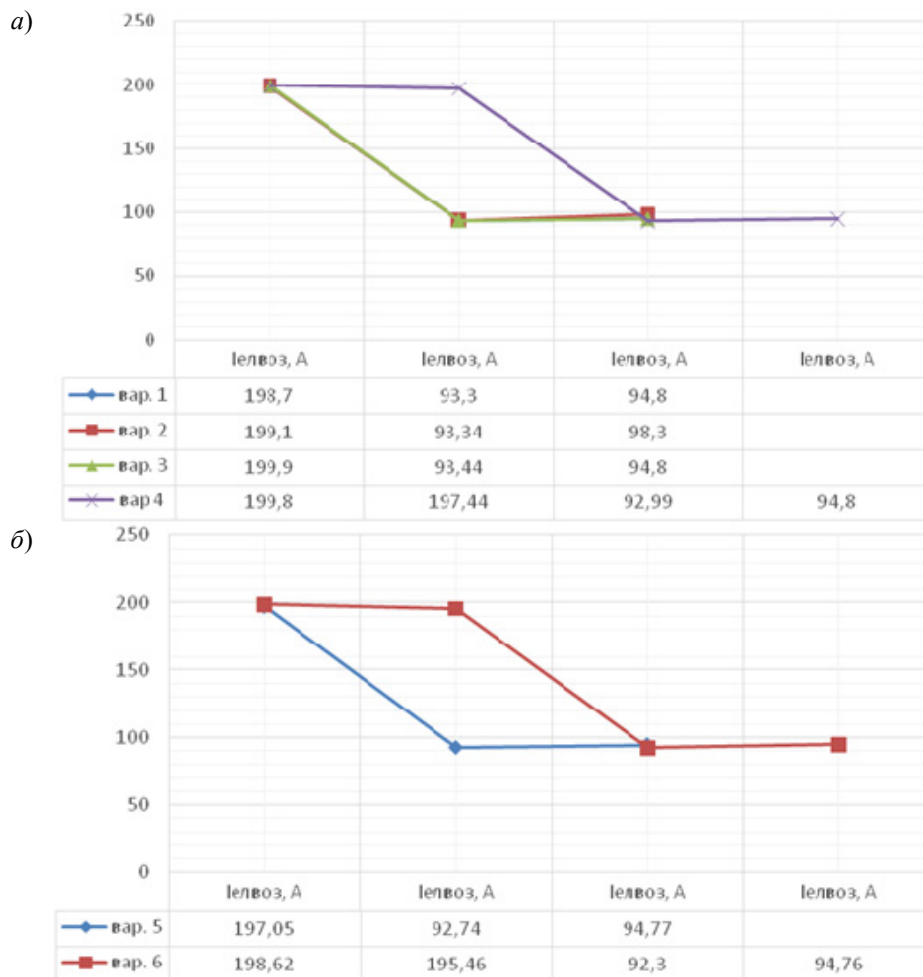


Рис. 7. Графіки струмів електровозу: а) при $\ell = 60$ км , б) $\ell = 80$ км

Таблиця 3

Кількість поїздів в пакеті, n	Інтервал часу попутного прямування, Δt , хв	Втрати потужності, ΔP , кВт	Довжина міжпідстанційної ділянки, ℓ , км
3	5	303,24	60 км
3	6	275,54	
3	7	240,5	
4	5	546,08	
3	5	399,22	80 км
4	5	710,71	

Висновки

1. Вимоги ПТЕ електрифікованих залізниць України щодо допустимого значення рівня напруги на струмоприймачі електровоза при заданих умовах імітаційного моделювання виконуються. Найбільший вплив на зміну напруги мають міжпідстанційна відстань, струм електровоза та інтервал часу попутного прямування; кількість поїздів в пакеті практично не впливає на цю величину.

2. Струмове навантаження фідерної зони при пакетному рухові швидкісних поїздів має імпульсний характер. Найбільший вплив на фідерний струм мають: міжпідстанційна відстань та інтервал часу попутного прямування; кількість поїздів в пакеті впливає «в середньому».

3. Збільшення втрат потужності в тяговій мережі при пакетному пропуску поїздів повинно враховуватися в складі технологічних втрат, які входять в умовні втрати, що визначаються різницею показів лічильників електричної енергії на тяговій підстанції і на електрорухомому складі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

REFERENCES

1. Транспортна стратегія України на період до 2020 року // Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.12.2010р. №2818-VI.
2. Про схвалення Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року // Кабінет Міністрів України. Розпорядження від 16 грудня 2009р. №1555-Р.
3. Biesenack, H. Тяговое электроснабжение высокоскоростных линий // Железные дороги мира, 2001, №6. – С.26 – 30.
4. Степанская, О. А. Особенности формирования нагрузок электротяговой сети скоростных линий железных дорог. Дисс. на соис. уч. ст. к.т.н., спец.: 05.22.07 – подвижной состав тел. дорог, тяга поездов и электрификация. – Санкт-Петербург, 2004. – 135с.
5. Hauptmann, A. Мощность тяговых подстанций для высокоскоростных линий. / A. Hauptmann // Железные дороги мира – 2002. – №8. – С.47-51.
6. Хворост, Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития / Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2003. – № 4. – С.104-114.
7. Хворост, Н.В. Совершенствование электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины для скоростного пассажирского движения. / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко, Н.Н. Панасенко // Залізничний транспорт України. – 2003. – №6. – С.25-31.
8. Міщенко, Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів / Т. М. Міщенко // Електротехніка і Електроенергетика. – 2014. – № 1. – С.19-28.
9. Міщенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; паралельне з'єднання елементів / Т. М. Міщенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Д. : ДНУЗТ, 2012. – Вип. 41. С.86 – 91.
10. Босий, Д.О. Імітаційне моделювання системи тягового електропостачання для дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях змінного струму / Д.О. Босий // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Д. : ДНУЗТ, 2008. – Вип. 24. С.49 – 54.
11. Босий, Д.О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму / Д.О. Босий, В.Г. Сиченко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. – 2009. – Ч.3. – С.86-89.
12. Сиченко, В.Г. Моделювання електротягового навантаження в задачах електромагнітної сумісності електрифікованих залізниць постійного струму / В.Г. Сиченко, Є.М.Гайсьонюк // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2010. – Ч.2. – С.185-188.
13. Лагута, І.І. Моделювання системи тягового
1. *Transportna strategiya Ukraini na period do 2020 roku* [Transport Strategy of Ukraine till 2020]. Approved by Cabinet of Ministers of Ukraine 21.12.2010 №2818-VI.
2. *Pro shvalennya Strategiyi rozvitku zaliznichnogo transportu na period do 2020 roku* [On approval of the Strategy of railway transport development for the period till 2020]. The Cabinet of Ministers of Ukraine. Order of 16 December 2009. №1555-P.
3. Biesenack H. *Tjagovoe jelektrснабzhenie vysokoskorostnyh liniy* [Traction power supply high-speed lines]. *Zheleznye dorogi mira – Railroad of the world*, 2001, №6. – P.26 – 30.
4. Stepanskaya O.A. *Osobennosti formirovaniya nagruzok jelektrotjagovoj seti skorostnyh liniy zheleznyh dorog* [Features of formation of the electrical traction loads the network of high-speed railway lines]. *Diss. na gois. uch. st. k.t.n., spec.: 05.22.07 – podvizhnoj sostav tel. dorog, tjaga poezdov i jelektrifikacija*. – Diss. on SOEs. art PhD, spec.: 05.22.07 - rolling tel roads, traction of trains and electrification. – St. Petersburg, 2004. – 135p.
5. Hauptmann A. *Moshchnost tyagovyh podstantsiy dlya vysokoskorostnyh liniy* [Power traction substations for high-speed lines]. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world* - 2002. - №8. - P.47-51
6. Hvorost N.V., Panasenکو N.V. *E'lektricheskie zheleznye dorogi: e'tapy i perspektivy razvitiya* [Electric Railways: stages and perspectives of development]. *Elektrotehnika i Elektromexanika – Electrical engineering and Electromechanics*. - 2003. - № 4. - P.104-114.
7. Hvorost N.V., Goncharov J. P., Panasenکو N. V., Panasenکو N. N. *Sovershenstvovanie e'lektricheskoy tyagi postoyannogo toka zheleznyx dorog Ukrainy dlya skorostnogo passazhirskogo dvizheniya* [The development of electric traction DC Railways of Ukraine for speed passenger traffic]. *Zaliznichnij transport Ukraini – Railway transport of Ukraine*. -2003. - No. 6. P. 25-31.
8. Mishchenko T.M. *Perspektivi shemotekhnichnih rishen i modelyuvannya pidsystem elektrichnoyi tyagi pri visokoshvidkysnomu rusi poyzdiv* [Prospects circuit design and modeling subsystems of electric traction under high-speed trains]. *Elektrotehnika i Elektroenergetika – Electrical and power*. - 2014. - No. 1. - Page 19-28.
9. Mishchenko T.M. *Teoretichni aspekti ta metodi identifikacii parametriv pristroiv sistemi elektrichnoyi tyagi. Metod mittsevyh potuzhnostej; paralel'ne z'ednannya elementiv* [Theoretical aspects and methods of identification of parameters of devices of the electric traction system. The method of instant capacity; parallel connection of elements]. *Visnik DNUZT – Bulletin of Dnepropetr. NAT. Univ Rail. Tr. Acad. V. Lazaryan – D.: DNURT*, 2012. - Vol. 41. P. 86 - 91.
10. Bosiy D.O. *Imitatsiyne modelyuvannya sistemi tyagovogo elektropostachannya dlya doslidzhennya pokaznykiv yakosti elektrichnoyi energiyi na tyagovyh pidstantsiyah zminnogo strumu* [Modeling of electric traction system for the study of indicators of quality of electric energy for traction substations AC]. *Visnik DNUZT – Bulletin of Dnepropetr. NAT. Univ Rail. Tr. Acad. V. Lazaryan - D : DNURT*, 2008. - Vol. 24. P. 49 - 54.
11. Bosiy D.O., V.G. Sichenko *Matematichne*

© Міщенко Т. М., 2015

електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами залізниць постійного струму. / І.І. Лагута, Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко, В.В. Замаруєв, В.В. Івахно, В.В. Божко, В.Н. Козачок, О.В. Сушко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск – 2011. – Ч.2. – С.258-264.

14. Сиченко, В.Г. Моделювання електромагнітних процесів перетворення електричної енергії на тяговій підстанції постійного струму / В.Г. Сиченко, Б.А. Рябокінь, О.Д. Словак // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск – 2011. – Ч.2. – С.245-250.

15. Киселів, І.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт: современные вызовы и перспективы развития. / И.П. Киселёв // Железнодорожный транспорт. –2012. –№11. –С.44-49.

16. Саввов, В.М. Обоснование параметров тягового электроснабжения и электроподвижного состава высокоскоростных железнодорожных линий в России. Дисс. на соис. уч. ст. к.т.н., спец.: 05.22.07 – подвижной состав тел. дорог, тяга поездов и электрификация. – Санкт-Петербург, 2002. – 136с.

17. Косарев, А.Б. Проблемы развития скоростного движения. / А.Б. Косарев, О.Н. Назаров // Материалы Второго международного симпозиума «Eltrans`2003», Санкт-Петербург. –2003. –С.42-54.

18. Марыкин, А.Н. Схемотехника современных тяговых подстанций постоянного тока и перспективные системы электроснабжения. / А.Н. Марыкин // Материалы международного симпозиума «Eltrans`2001», Санкт-Петербург. –2002. –С.147-155.

19. Котельников, А. Основные требования к системам и устройствам тягового электроснабжения скоростных и высокоскоростных магистралей. / А. Котельников // 6th International Conference “Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe”, Warszawa, Poland, –2003. –P.35-41.

20. Бадёр, М.П. Концепция обновления и перспективы технического развития систем тягового электроснабжения /М.П. Бадёр, В.Г. Сыченко // Технічна електродинаміка. Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 2. –Київ. – 2009. –С.88-93.

21. Міщенко, Т.М. Математичне моделювання перехідних процесів в системі змінного струму «тягова мережа – електропоз» 1. Вмикання силового трансформатора електропоза в режимі холостого ходу; оцінка параметрів / Т.М. Міщенко, А.І. Кійко // Вісник ДНУЗТ. – 2011. – Вип.36. – С. 88-93.

22. Справочник по электроснабжению железных дорог. Под ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. –256 с.

23. Сорин, Л.Н. Электропозы нового поколения и организация их разработки / Л.Н. Сорин, В.П. Янов // Материалы Второго международного симпозиума «Eltrans`2003», Санкт-Петербург. – 2003. – С.115-122.

24. Сергієнко, М.І. Основні вимоги і схемотехнічні рішення тягового частотно-регульованого електроприводу пасажирських електропозів. / М.І. Сергієнко, М.В. Панасенко // Залізничний транспорт України. –2009. –№5. –С.43-54.

modelyuvannya elektroyagovogo navantazhennya v zadachah vivchennya elektromagnitnih protsesiv dlya sistem elektropostachannya elektrichnogo transportu zminnogo strumu [Mathematical modeling of electrical traction load problems in the study of electromagnetic processes for electric vehicle power supply systems AC]. *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichniy vipusk* – Technical electro-dynamics. Thematic issue. – 2009 – Part 3. – P.86-89

12. Sichenko V.G., Haysonok Ye.M. *Modelyuvannya elektroyagovogo navantazhennya v zadachah elektromagnitnoyi sumisnosti elektrifikovanih zaliznits postynogo strumu* [Modeling of electrical traction load in problems EMC electrified railways DC] / *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichniy vipusk «Silova elektrodinamika ta energoeftivnist»* – Technical electro-dynamics. Thematic issue. Power Electronics and Energy Efficiency. – 2010 – Part 2. – P.185-188.

13. Lahuta I.I., Goncharov J.P., Panasenkov M.V., Bozhko V.N., Kozachok V.V., Zamaruyev V.V., Ivahno V.V., Sushko O.V. *Modelyuvannya sistemi tyagovogo elektropostachannya z napivprovodnikovimi peretvoryuvachami zaliznits postynogo strumu* [Modeling of traction power supply with semiconductor converters DC Railway]. *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichniy vipusk* – Technical electro-dynamics. Themed Issue – 2011 – Part 2. – P.258-264.

14. Sichenko V.G., Ryabokon B.A., Slovak O.D. *Modelyuvannya elektromagnitnih protsesiv peretvorenniya elektrichnoyi energiyi na tyagoviy pidstantsiyi postynogo strumu* [Modeling of electromagnetic processes for converting electrical energy substation DC] / *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichniy vipusk* – Technical electro-dynamics. Themed Issue – 2011 – Part 2. – P.245-250.

15. Kysel'ev I.P. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport: sovremennye vyzovy i perspektivi razvitiya* [High-speed rail transport: current challenges and prospects]. *Zheleznodorozhnyy transport* – Railway transport. –2012. – No. 11. –P. 44-49.

16. Savvov V.M. *Obosnovanie parametrov tyagovogo elektrosnabzheniya i elektropodvizhnogo sostava vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh liniy v Rossii* [Substantiation of parameters of the traction power supply and electric rolling stock of high-speed railway lines in Russia]. *Diss. na sois. uch. st. k.t.n., spets.: 05.22.07 – podvizhnoy sostav tel. dorog, tyaga poezdov i elektrifikatsiya* – Diss. on SOEs. art PhD, spec.: 05.22.07 - rolling tel roads, traction of trains and electrification. – St. Petersburg, 2002. – P.136.

17. Kosarev A.B., Nazarov A. N. *Problemy razvitiya skorostnogo dvizheniya* [Problems of development of high-speed traffic]. *Materialy Vtorogo mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans`2003»* – Proceedings of the Second international Symposium, Eltrans`2003, St. Petersburg. –2003. – Page 42-54.

18. Marukin A. N. *Shemotekhnika sovremennykh tyagovykh podstanciy postojannogo toka i perspektivnye sistemy jelektrosnabzheniya* [The circuitry of modern traction substations DC current and future electricity system]. *Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans-2001»* – Proceedings of the international Symposium "Eltrans`2001, St. Petersburg. –2002. P. 147-155.

19. Kotelnikov A. *Osnovnye trebovaniya k sistemam i ustrojstvam tyagovogo jelektrosnabzheniya skorostnykh i vysokoskorostnykh magistralej* [Basic requirements for systems and traction power supply devices and high-speed highways]. *6th International Conference “Modern Electric Traction in Inte-*

25. Панасенко, Н.В. Концепция силовых схем тяговых асинхронных электропередач магистральных электровазов разных категорий и назначения для железных дорог Украины. / Н.В. Панасенко, Н.Н. Панасенко, В.Н. Панасенко // Вестник ВЭЛНИИ, Новочеркасск, ОАО «ВЭЛНИИ». – 2008. – №3(52). – С.15-20.

26. Лашко, А.Д. Технічні вимоги до тягового рухомого складу нового покоління. / А.Д. Лашко, С.Г. Грищенко // Залізничний транспорт України. – 2008. – №3. – С.11-14.

27. Міщенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; послідовне з'єднання елементів. / Т. М. Міщенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Д. : ДНУЗТ, 2012. – Вип. 41. – С.121 – 126.

28. Колодяжный, Н. В. Высокоскоростное пассажирское движение. – М.: Транспорт, 1967. – 415 с.

Надійшла до друку 15.05.2015.

grated XXIst Century Europe” – 6th International Conference “Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe”, Warszawa, Poland, -2003. -P. 35-41.

20. Bader M.P., Sichenko V.G. *Koncepcija obnovenija i perspektivy tehničeskogo razvitija sistem tjagovogo jel-ektrosnabzhenija* [The concept of renovation and perspectives technical development of traction power supply]. *Tehni-chna elektrodinamika. Temat. vip. Silova elektronika ta energoefektivnist'* – Technical electrodynamics. Theme. vol. Power electronics and energy efficiency. Part 2. -Kiev. -2009. -P. 88-93.

21. Mischenko T.M., Kiyko A.I. *Matematichne modelyuvannya perehidnih protsesiv v sistemi zminnogo strumu «tyagova mreza – elektrovoz» 1. Vmikannya silovogo transformatora elektrovoza v rezhimi holostogo hodu; otsinka parametriv* [Mathematical modeling of transients in the AC system with a traction chain - electric locomotive" 1. The inclusion of a power transformer locomotive idling; estimation of parameters]. *Visnyk DNUZT* – Bulletin of DNURT. - 2011. - Vol.36. P. 88-93.

22. *Spravochnik po elektro-snabzheniyu zheleznyh dorog* [Handbook of railway power supply]. Ed. K.G. Marquardt. - Moscow Transport, 1980. -256 p.

23. Sorin L.N., Yanov V.P. *Jelektrovozy novogo pokolenija i organizacija ih razrabotki* [A new generation of electric and organization development]. *Materialy Vtorogo mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans-2003»* – Proceedings of the Second International Symposium "Eltrans' 2003", St. Petersburg. - 2003. - P.115-122.

24. Sergienko M.I., Panasenکو N. In. *Osnovni vymogy i sxemotexnichni rishennya tyagovogo chastotno-regulovanogo elektropryvodu pasazhyrskykh elektrovoziv* [Basic requirements and circuit solutions traction frequency-controlled electric passenger locomotives]. *Zaliznychnyj transport Ukrainy* – The Railway transport of Ukraine. - 2009. - No. 5. P. 43-54.

25. Panasenکو N.V., Panasenکو N.N., Panasenکو V.N. *Koncepcija silovykh shem tjagovykh asinhronnykh jel-ektroperedach magistral'nykh jelektrovozov raznykh kategorij i naznachenija dlja zheleznyh dorog Ukrainy* [The concept of power circuits of traction power asynchronous electric locomotives of different categories and destination for the railways of Ukraine]. *Vestnik VJelNII* – Bulletin VELNII, Novocherkassk, JSC "VELNII." -2008. -№3 (52). -P.15-20.

26. Lasko A.D., Grishchenko S. G. *Tekhnichni vimogy do tjagovogo ruhomogo skladu novogo pokolinnja* [Technical requirements for traction rolling stock of the new generation]. *Zaliznychnij transport Ukrainy* – The Railway transport of Ukraine. -2008. - No. 3. -P. 11-14.

27. Mischenko T.M. *Teoretichni aspekty ta metody identyfikacii parametriv pristroiv sistemi elektrichnoi tja-gi. Metod mittevykh potuzhnostej; poslidovne z'ednannja elementiv* [Theoretical aspects and methods of identification of parameters of devices of the electric traction system. The method of instant capacity; serial connection elements]. *Visnik DNUZT* – Bulletin of Dnepropetr. NAT. Univ Rail. Tr. Acad. V. Lazaryan - D : DNURT, 2012. - Vol. 41. P. 121 – 126

28. Kolodyazhny N.V. *Vysokoskorostnoe passazhirskoe dvizhenie* [High-speed passenger traffic]. - М.: Транспорт, 1967. - 415 p.

Внутрішній рецензент Костін М. О.

Зовнішній рецензент Випанасенко С. І.

© Міщенко Т. М., 2015

Впровадження швидкісного руху поїздів на залізницях України можливо лише після докладних досліджень електромагнітних і електроенергетичних процесів в пристроях системи тягового електропостачання. Останнє, в свою чергу, можливо лише методом моделювання, зокрема імітаційного, оскільки на сьогодні швидкісний рух поїздів в Україні відсутній і тому експериментальні дослідження неможливі.

Метою роботи було розробити в середовищі Matlab (Simulink) імітаційну модель електромагнітних процесів, що протікають в тяговій мережі змінного струму, при пакетному русі швидкісних поїздів, і шляхом моделювання визначити напругу на струмоприймачі електровоза, його струм, а також фідерний струм і втрати потужності в тяговій мережі при різних параметрах руху поїздів. Застосована методика імітаційного моделювання (в середовищі Matlab) поїздної ситуації на міжпідстанційній ділянці при різних варіантах кількості поїздів в пакеті і відстані між поїздами. Розрахована напруга на струмоприймачах електровозів в пакетах, їх струм, а також струм і втрати потужності на ділянках тягової мережі при пакетному русі швидкісних, зі швидкістю 200 км/год, поїздів. В розробленій імітаційній моделі процесів в системі тягового електропостачання вперше запропонована ідентифікаційна модель електрорухомого складу (електровозу) змінного струму. Вперше встановлено закономірності впливу кількості поїздів в пакеті, міжпідстанційної відстані та інтервалу часу попутного прямування поїздів на напругу на струмоприймачах, їх струми, а також на фідерний струм і витрати потужності в тяговій мережі.

Показано, що вимоги ПТЕ електрифікованих залізниць України за допустимим значенням рівня напруги на струмоприймачі електровоза при заданих умовах імітаційного моделювання виконуються. Підвищення втрат потужності в тяговій мережі при пакетному русі поїздів повинно враховуватися в склад і технологічних втрат, які входять в умовні втрати потужності.

Ключові слова: моделювання; пакети поїздів; швидкісний рух; тягова мережа; напруга; струм; електро-воз; тягова підстанція.

УДК 621.335.04 : 621.333

Т. Н. МИЩЕНКО (ДНУЖТ)

Кафедра «Електроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел.: (099)136-96-25, ел. почта: mishchenko_tn@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6336-7350

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПРИ ПАКЕТНОМ ДВИЖЕНИИ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ

Внедрение скоростного движения поездов на железных дорогах Украины возможно лишь после подробных исследований электромагнитных и электроэнергетических процессов в устройствах системы тягового электроснабжения. Последнее, в свою очередь, возможно только методом моделирования, в частности имитационного, поскольку на сегодня скоростное движение поездов в Украине отсутствует и поэтому экспериментальные исследования невозможны.

Целью работы было разработать в среде Matlab (Simulink) имитационную модель электромагнитных процессов, протекающих в тяговой сети переменного тока, при пакетном движении скоростных поездов, и путем моделирования определить напряжение на токоприемнике электровоза, его ток, а также фидерный ток и потери мощности в тяговой сети при различных параметрах движения поездов. Применена методика имитационного моделирования (в среде Matlab) поездажной ситуации на межподстанционном участке при различных вариантах количества поездов в пакете и расстояния между поездами. Рассчитано напряжение на токоприемниках электровозов в пакетах, их ток, а также ток и потери мощности на участках тяговой сети при пакетном движении скоростных, со скоростью 200 км/ч, поездов. В разработанной имитационной модели процессов в системе тягового электроснабжения впервые предложена идентификационная модель электроподвижного состава (электровоза) переменного тока. Впервые установлены закономерности влияния количества поездов в пакете, межподстанционного расстояния и интервала времени попутного следования поездов на напряжение на токоприемниках, их токи, а также на фидерный ток и потери мощности в тяговой сети.

Показано, что требования ПТЭ электрифицированных железных дорог Украины по допустимым значениям уровня напряжения на токоприемники электровоза при заданных условиях имитационного моделирования выполняются. Повышение потерь мощности в тяговой сети при пакетном движении поездов должно учитываться в состав технологических потерь, которые входят в условные потери мощности.

Ключевые слова: моделирование; пакеты поездов; скоростное движение; тяговая сеть; напряжение; ток; электровоз; тяговая подстанция.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Вытанасенко С. И.*

UDC 621.335.04 : 621.333

T. M. MISHCHENKO (DNURT)

Department of Electric Power Supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan st. 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010,
tel.: +38(097)485-68-21, e-mail: mishchenko_tn@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6336-7350

MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TRACTION NETWORK WITH BATCH-SPEED TRAINS

The introduction of high-speed trains on the railways of Ukraine is possible only after detailed studies of electromagnetic and electric power processes in devices of traction power supply system. The latter, in its turn, is possible only by modeling, including imitative, because high-speed trains in Ukraine is missing and therefore experimental studies impossible.

The purpose of the work was to develop in Matlab (Simulink) imitative model of electromagnetic processes in traction AC in batch high-speed trains, and by modeling to determine the voltage at the pantograph of the locomotive, its current and feeder current and power loss in traction network for various parameters of trains. The technique of modeling (in Matlab) train situation at mipasiasync section in different variants, the number of trains in the package and the distance between trains. The calculated stress on scrumpymacs locomotives in packages, their current, as well as current and power loss sections traction network for batch movement speed, with a speed of 200 km/h trains. In developed simulation models of processes in the system traction power supply first proposed identification model electric rolling stock (locomotive) AC. For the first time the regularities of the influence of the number of trains in service, miptsteatte distance and time interval passing of trains on the voltage at scrumpymacs, their currents, and the feeder current and power loss in traction network.

It is shown that the requirements of PTE electrified Railways of Ukraine on valid input level voltage at the pantograph of the locomotive under the given conditions of the modeling are performed. The increase of power losses in traction network in packet trains should be taken into account in the composition and process losses, which are included in the contingent loss of power.

Keywords: modeling; packages trains; speed; power train; voltage; current; electric; traction substation.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Vypanasenko S. I.*

М. С. ПРИХОДА (ДНУЗТ)

Кафедра «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056)793 19 11, ел. пошта: ms_estimate@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-4122-3193

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМИКАЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОМУТАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ ПРИ ПРИЄДНАННІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Вступ

На сьогоднішній день в Україні постає питання переходу живлення з традиційних на альтернативні джерела електроенергії. Це пов'язано з значним підняттям цін на електричну енергію та важкою економічною ситуацією. Зокрема, це стосується і залізничного транспорту. Потенціал альтернативної енергетики перевищує 100 млн. тонн умовного палива, але при цьому на 2014 рік частка використання складає лише 0,02 %.

Сучасні концепції енергозбереження на залізничному транспорті на сьогодні представлені різними підходами і напрямками. Значний інтерес викликають роботи таких авторів, як С.П. Денисюк, В.Г. Кузнецов та ін. Одним з напрямів енергозбереження є перехід на живлення від альтернативних джерел електроенергії.

Мета

Все частіше до тягових підстанцій електрифікованих залізниць прагнуть приєднатися власники сонячних електростанцій. При цьому виникає ряд проблем, оскільки такі приєднання ще не досить досконально вивчені та проаналізовані. На сьогоднішній день в Україні не існує нормативних документів, якими б можна було керуватись при приєднанні сонячних електростанцій (СЕС) до шин тягових підстанцій. Власникам СЕС вигідніше приєднатися до шин 10 кВ тягових підстанцій, але при цьому виникають питання стійкості такої системи, спрацьовування релейного захисту та вимикаючої здатності вже встановлених вимикачів.

Приклад розгляду питання стійкості сонячної системи великої потужності визначено у [1]. Метою даної статті є дослідження вимикаючої здатності при приєднанні СЕС та перевірка вже встановлених вимикачів тягових підстанцій на термічну та динамічну стійкість.

Вимикач є одним з найважливіших апаратів, від якого залежить надійна робота не тільки розподільного пристрою, де вони встановлені, але часто і всієї енергосистеми. Найбільш відповідальною операцією для вимикачів можна вважати відключення великих струмів короткого замикання, досягаючих декількох десятків кілоампер. Для збереження стійкої роботи елементів системи відключення к.з. повинно проводитися дуже швидко, протягом двох напівперіодів.

Вимикач повинен бути пристосований для швидкого автоматичного повторного включення (АПВ), добре протистояти к.з., які виникають у процесі аварійного відключення і витримувати без пошкоджень включення в протифазі.

Поряд з цим вимикач повинен також надійно відключати малі індуктивні і ємнісні струми без появи при цьому небезпечних комутаційних перенапруг. Конструкція вимикача повинна бути простою, експлуатація його легкою; він повинен володіти високою ремонтпридатністю, мати високий коефіцієнт готовності: при дуже низькій тривалості використання (від однієї до трьох хвилин на рік) вимикач повинен бути завжди готовим до роботи.

Нарешті, вимикач повинен багаторазово і надійно включати і відключати номінальні струми, а перебуваючи у включеному стані, необмежено довго витримувати вплив номінальних струму і напруги, а також короточасні термічні та динамічні дії наскрізних струмів короткого замикання [2].

При приєднанні сонячних електростанцій до шин тягової підстанції гостро постає питання перевірки встановлених вимикачів на спрацьовування у момент короткого замикання. Необхідно зробити розрахунки та визначити електродинамічну стійкість, термічну стійкість вимикачів та струми короткого замикання при такому приєднанні [3]. В електричних установках напругою вище 1000 В відповідно

до ПУЕ [4] за режимом к.з. перевіряють електричні апарати, струмопроводи, кабелі та інші провідники, опорні і несучі конструкції для них, а також повітряні лінії електропередачі при ударному струмі к.з. більше 50 кА і відстані між розпірками розщеплених проводів.

Результати дослідження

Для визначення електродинамічної стійкості за розрахунковий вид короткого замикання приймають – трифазне к.з., а для визначення термічної стійкості приймають – трифазне або двофазне к.з.

Термічна стійкість апаратів визначається умовою теплового імпульсу струму:

$$I_{н.тер}^2 \cdot t_{н.тер} \geq B_k \quad (1)$$

де $I_{н.тер}$ – середньоквадратичне значення струму за час його протікання (струм термічної стійкості) по каталогу; $t_{н.тер}$ – тривалість протікання струму термічної стійкості по каталогу; B_k – тепловий імпульс струму к.з. (імпульс квадратичного струму к.з.), який характеризує кількість тепла, що виділяється в апараті за час дії струму к.з..

Вимикач буде задовольняти умові (1), якщо :

$$B_k \leq B_{авар.доп} \quad (2)$$

де B_k – тепловий імпульс (інтеграл Джоуля) струму к.з. у колі; $B_{авар.доп}$ – допустиме значення теплового імпульсу (інтеграла Джоуля) для вимикача.

Допустиме значення теплового імпульсу $B_{авар.доп}$ для комутаційних апаратів залежить не тільки від вказаного заводом нормованого струму термічної стійкості $I_{н.тер}$, а і від співвідношення між розрахунковою тривалістю струму к.з. $t_{відкл.}$ і допустимим часом термічної стійкості $t_{н.тер}$ [5].

Якщо $t_{відкл.} \geq t_{н.тер}$ в цьому випадку допустиме значення теплового імпульсу $B_{авар.доп}$ дорівнює:

$$B_{авар.доп} = I_{н.тер}^2 \cdot t_{н.тер} \quad (3)$$

В тому випадку якщо $t_{відкл.} \leq t_{н.тер}$, то допустиме значення теплового імпульсу $B_{авар.доп}$ дорівнює:

$$B_{авар.доп} = I_{н.тер}^2 \cdot t_{відкл.} \quad (4)$$

Електродинамічна стійкість характеризується амплітудою ударного струму к.з., який здатний пропустити вимикач без залишкових деформацій деталей або неприпустимого відбросу контактів, що приводить до їх приварювання або вигорання. Якщо значення електродинамічної стійкості в каталозі не наводиться, то це означає, що стійкість вимикача визначається його комутаційною здатністю.

По вимикаючій здатності перевірка проводиться за умовою:

$$i_y \leq i_{вкл}; I_{н,0} \leq I_{вкл} \quad (5)$$

де i_y – ударний струм к.з. в ланцюгу вимикача; $I_{н,0}$ – значення періодичної складової струму к.з. в ланцюгу вимикача; $I_{вкл}$ – номінальний струм вмикання (діюче значення періодичної складової); $i_{вкл}$ – найбільший пік струму вмикання (по каталогу). Заводами дотримується умова $i_{вкл} = 1,8\sqrt{2} \cdot I_{вкл}$, де $k_y = 1,8$ – ударний коефіцієнт, нормований для вимикачів.

На електродинамічну стійкість вимикач перевіряється по граничним наскрізним струмам к.з.:

$$i_y \leq i_{дин}; I_{н,0} \leq I_{дин} \quad (6)$$

де $i_{дин}$ – струм електродинамічної стійкості (по каталогу); $I_{дин}$ – діюче значення періодичної складової граничного наскрізного струму к.з. [6].

При перевірці вимикачів за зазначеними формулами необхідно враховувати, що наприклад, для вакуумних вимикачів проводять перевірку на стійкість та придатність ще за наскрізними струмами короткого замикання. При перевірці вимикач піддається значним термічним та динамічним навантаженням.

При розрахунках до розгляду приймемо різні типи вимикачів, що найбільш частіше застосовуються на приєднаннях різного класу напруги.

Таблиця 1

Перевірені вимикачі на шинах 110 кВ

№	Тип вимикача	Іном відключення., кА	Дугогасне середовище
I	ВГП-110У1	40	Елегаз
II	BPC-110	31,5	Вакуум
III	МКП-110М	20	Маслонаповнений

Таблиця 2

Перевірені вимикачі на шинах 35 кВ

№	Тип вимикача	Іном відключення., кА	Дугогасне середовище
I	SPS-2	40	Елегаз
II	BP35-35-20/1000У2	20	Вакуум
III	ВМК-35-Б-1000	25	Маслонаповнений

Таблиця 3

Перевірені вимикачі на шинах 10 кВ

№	Тип вимикача	Іном відключення., кА	Дугогасне середовище
I	LF3-10	25	Елегаз
II	ВВ/TEL-10-20/1000У2	20	Вакуум
III	ВМГ-133-II-1000	20	Маслонаповнений

Таблиця 4

Перевірені вимикачі на шинах 27,5 кВ

№	Тип вимикача	Іном відключення., кА	Дугогасне середовище
I	BP27HC	25	Вакуум
II	ВВУ-СЕШ-27,5	20	Маслонаповнений

При цьому для визначення вимикаючої здатності цих вимикачів зробимо порівняльний аналіз струмів к.з. до та після приєднання СЕС до шин різної напруги тягової підстанції постійного та змінного струму. На рисунках 1-6

представлені графіки залежностей струму к.з. при збільшенні потужності СЕС на приєднанні до шин 110, 35, 10 та 27,5 кВ підстанцій постійного та змінного струму відповідно.

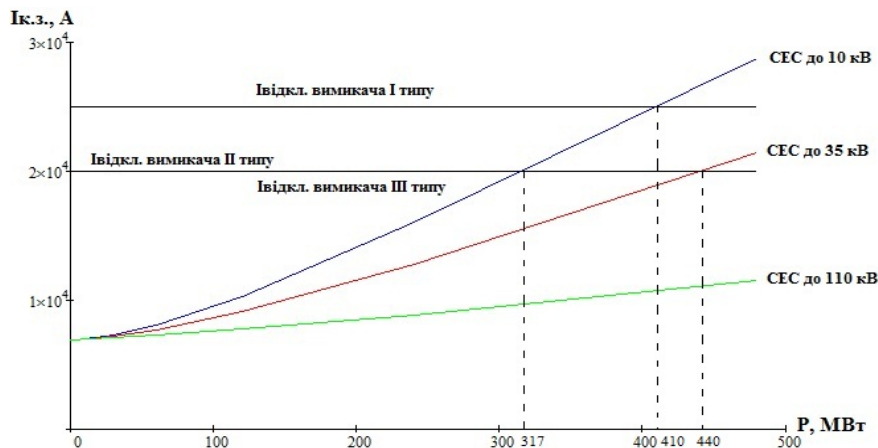


Рис.1. Графік залежності зміни струму к.з. на шинах 10 кВ підстанції постійного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

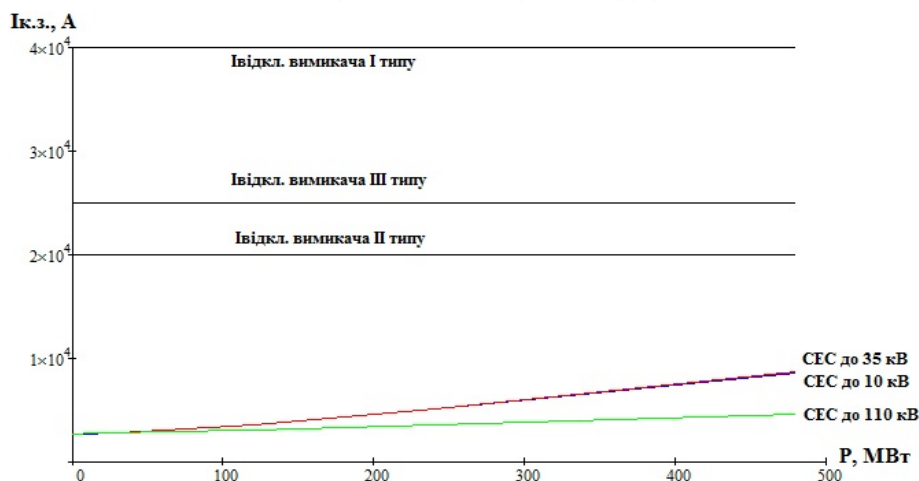


Рис. 2. Графік залежності зміни струму к.з. на шині 35 кВ підстанції постійного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

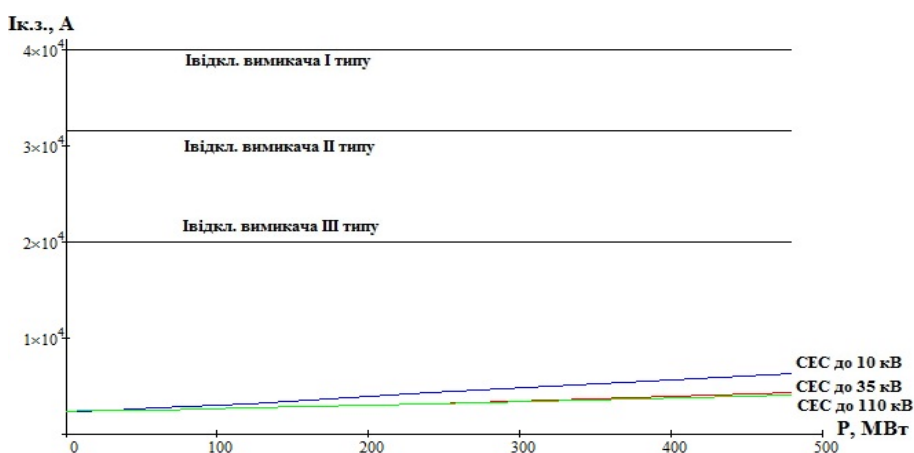


Рис. 3. Графік залежності зміни струму к.з. на шині 110 кВ підстанції постійного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

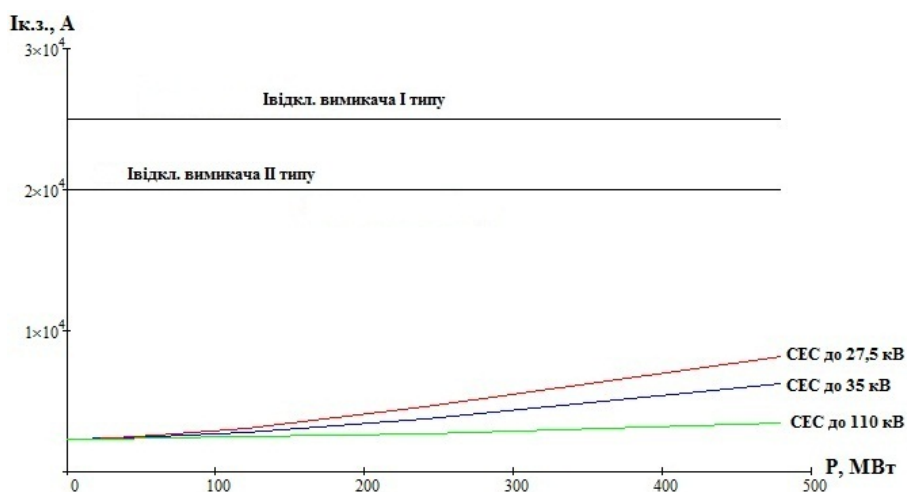


Рис. 4. Графік залежності зміни струму к.з. на шині 27,5 кВ підстанції змінного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

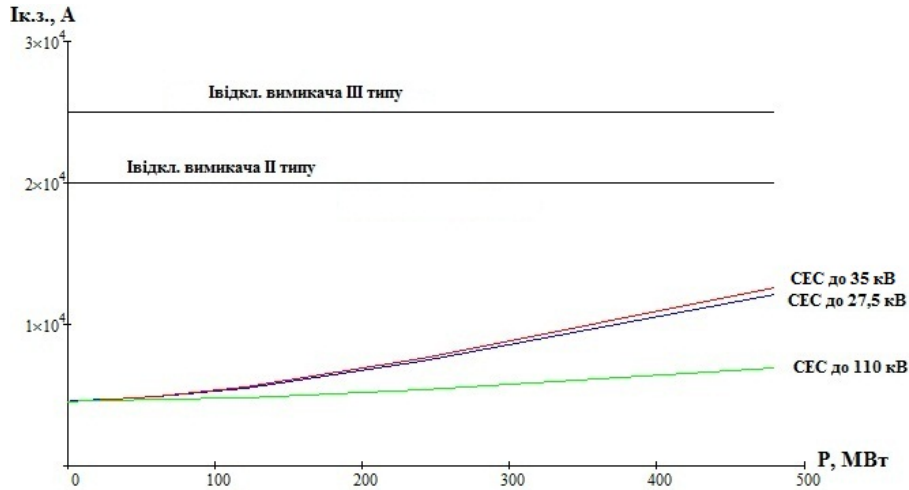


Рис. 5. Графік залежності зміни струму к.з. на шинах 35 кВ підстанції змінного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

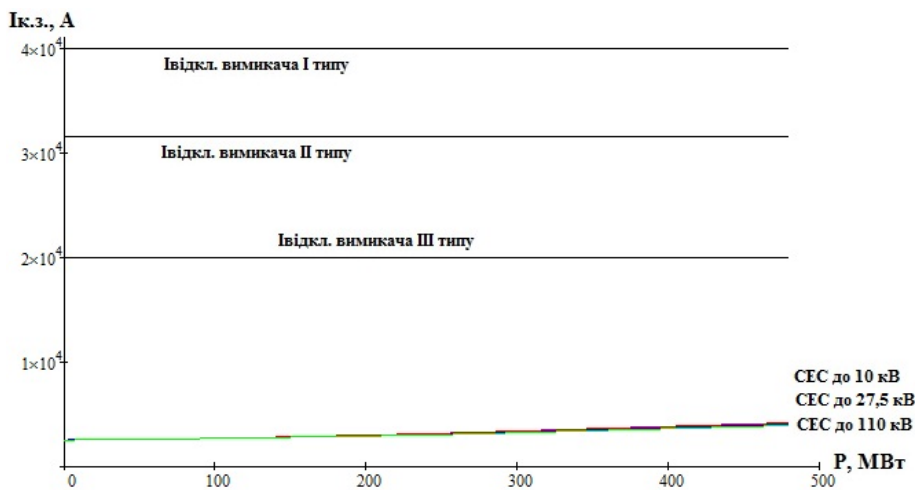


Рис. 6. Графік залежності зміни струму к.з. на шинах 110 кВ підстанції змінного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

Для визначення термічної та динамічної стійкості встановлених вимикачів проведемо аналіз зміни трифазних та двофазних струмів к.з. у відсотках на шинах високої, середньої та

низької напруги в залежності від збільшення потужності встановленої СЕС на підстанції постійного струму.

Таблиця 5

Аналіз збільшення струму к.з. на шинах 10 кВ підстанції постійного струму при приєднанні СЕС

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт					
	4,1	30,1	60,1	120,1	240,1	480,1
Струми трифазного к.з., %						
10 кВ	0,519	5,914	14,829	33,101	56,877	76,019
35 кВ	0,436	4,325	10,447	24,268	46,426	68,249
110 кВ	0,414	5,429	12,07	25,249	44,519	62,166
Струми двофазного к.з., %						
10 кВ	0,516	5,917	14,829	33,098	56,893	78,593
35 кВ	0,419	4,309	10,441	24,259	46,414	68,244
110 кВ	0,43	5,407	12,078	25,242	44,51	62,166

Таблиця 6

**Аналіз збільшення струму к.з. на шинах 35 кВ підстанції постійного струму
при приєднанні СЕС**

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт					
	15	30	60	120	240	480
Струми трифазного к.з., %						
10 кВ	1,869	4,324	10,426	24,107	46,043	67,725
35 кВ	2,072	4,694	11,064	25,007	46,962	68,548
110 кВ	1,308	2,744	5,761	12,331	25,319	44,835
Струми двофазного к.з., %						
10 кВ	1,868	4,333	10,437	24,113	46,032	67,728
35 кВ	2,063	4,697	11,053	24,992	46,962	68,544
110 кВ	1,267	2,736	5,724	12,332	25,295	44,826

Таблиця 7

**Аналіз збільшення струму к.з. на шинах 110 кВ підстанції постійного струму
при приєднанні СЕС**

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт					
	15	30	60	120	240	480
Струми трифазного к.з., %						
10 кВ	1,216	2,486	5,165	10,824	22,077	40,173
35 кВ	1,224	2,523	5,218	10,942	22,317	40,563
110 кВ	1,273	2,633	5,466	11,39	23,121	41,876
Струми двофазного к.з., %						
10 кВ	1,223	2,479	5,14	10,828	22,077	40,174
35 кВ	1,206	2,503	5,188	10,911	22,302	40,555
110 кВ	1,28	2,619	5,45	11,404	23,117	41,876

Знаючи величини струмів к.з. та залежність їх зміни від величини встановленої СЕС, проведемо перевірку встановлених вимикачів

на термічну стійкість. Для цього скористаємося формулами (3) та (4) і зведемо всі дані до таблиць 4-6.

Таблиця 8

**Результати розрахунків теплового імпульсу струмів к.з. при приєднанні СЕС
до шин 10 кВ тягової підстанції постійного струму**

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт						
	0	4.1	30.1	60.1	120.1	240.1	480.1
Тепловий імпульс струмів к.з., кА ² сек							
10 кВ	50	50,57	56,54	68,9	111,82	269,14	870,31
35 кВ	7,9	7,97	8,63	9,85	13,77	27,5	78,36
110 кВ	11,85	11,95	13,25	15,32	21,2	38,49	82,76

Таблиця 9

**Результати розрахунків теплового імпульсу струмів к.з. при приєднанні СЕС
до шин 35 кВ тягової підстанції постійного струму**

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт						
	0	15	30	60	120	240	480
Тепловий імпульс струмів к.з., кА ² сек							
10 кВ	51,98	53,98	56,8	64,78	90,25	178,54	499
35 кВ	7,9	8,23	8,68	9,97	14,03	28,1	80,3
110 кВ	11,2	11,5	11,86	12,63	14,6	20,11	36,85

Таблиця 10

Результати розрахунків теплового імпульсу струмів к.з. при приєднанні СЕС до шин 110 кВ тягової підстанції постійного струму

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт						
	0	15	30	60	120	240	480
Тепловий імпульс струмів к.з., кА ² сек							
10 кВ	50	51,3	52,63	55,65	62,9	82,42	139,8
35 кВ	7,9	8,1	8,3	8,8	9,96	13,09	22,4
110 кВ	11,85	12,16	12,5	13,26	15,1	20,05	35,07

Для перевірки встановлених вимикачів на динамічну стійкість скористаємось умовою (5). Але в нашому випадку достатньо провести перевірку лише за однією умовою, оскільки для

нашої системи $k_y = 1,8$. Тому зробимо розрахунок лише ударного струму і зведемо отримані дані до таблиць.

Таблиця 11

Результати розрахунків ударних струмів при приєднанні СЕС до шин 10 кВ тягової підстанції постійного струму

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт						
	0	4.1	30.1	60.1	120.1	240.1	480.1
Ударні струми, кА							
10 кВ	17,6	17,7	18,7	20,7	26,3	40,8	73,4
35 кВ	6,99	7,02	7,3	7,8	9,24	13,01	22,03
110 кВ	6,13	6,16	6,5	6,97	8,2	11,05	16,2

Таблиця 12

Результати розрахунків ударних струмів при приєднанні СЕС до шин 35 кВ тягової підстанції постійного струму

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт						
	0	15	30	60	120	240	480
Ударні струми, кА							
10 кВ	17,94	18,28	18,75	20,03	23,64	33,25	55,6
35 кВ	6,9	7,11	7,33	7,86	9,3	13,18	22,2
110 кВ	5,96	6,04	6,13	6,33	6,8	7,98	10,8

Таблиця 13

Результати розрахунків ударних струмів при приєднанні СЕС до шин 110 кВ тягової підстанції постійного струму

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт						
	0	15	30	60	120	240	480
Ударні струми, кА							
10 кВ	17,6	17,82	18,05	18,56	19,74	22,6	29,4
35 кВ	6,99	7,08	7,17	7,38	7,8	9,26	11,77
110 кВ	6,13	6,2	6,3	6,5	7	7,97	10,55

Висновки

При приєднанні СЕС до шин 110, 35, 10 та 27,5 кВ різної потужності підстанцій постійного і змінного струму необхідно зробити повторні перевірки вимикачів на спрацювання за струмами к.з. та перевірку на термічну і електродинамічну стійкість. Було проведено дослідження вимикаючої здатності

вимикачів тягової підстанції постійного та змінного струму. По розрахованих даних струмів к.з. при приєднанні СЕС до шин різної потужності можна стверджувати, що максимальна потужність приєднаної СЕС для шин 10 кВ (при паралельній роботі з тяговим трансформатором, приєднаних до різних секцій шин) не повинна перевищувати 331 МВт, для шин 35 кВ – 440 МВт для підстанції постійного

струму, при номінальному струмі відключення вимикача 2 кА. Для підстанції змінного струму обмежень за потужністю для розрахункового діапазону СЕС до 500 МВт не виявлено. Перевірка за термічною стійкістю встановлених вимикачів показує, що розрахунковий тепловий

імпульс струмів не перевищує каталожних даних встановлених вимикачів. Перевірка за електродинамічною стійкістю встановлених вимикачів показує, що при встановленні СЕС до шин 10 та 35 кВ ударні струми при потужності СЕС вище 400 МВт вище каталожних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jason P. Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants / P. Jason // Renewable and Sustainable Energy Reviews / vol. 27, 2013. - pp. 435-444.
2. Усов С.В. Электрическая часть электростанций / Под ред. С.В. Усова // Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 616 с.
3. Сиченко В.Г. Аналіз впливу сонячної генерації на роботу тягових підстанцій електрифікованих залізниць / Сиченко В.Г., Бондар О.І., Прихода М.С. // Світлотехніка та електроенергетика №1(41). 2015. - 10-17 с.
4. Правила улаштування електроустановок. Четверте видання, перероблене й доповнене - Х.: Вид-во «Форт», 2011.— 736 с.
5. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н. Неклепаева. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. -152 с.
6. Ленков Ю.А. Выбор коммутационных аппаратов и токоведущих частей распределительных устройств электрических станций и подстанций. Учебное пособие./ Ленков Ю.А., Хожин Г.Х. – Павлодар: ПГУ, 2002. – 210 с.

Надійшла до друку 12.05.2015.

REFERENCES

1. Jason P. Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants / P. Jason // Renewable and Sustainable Energy Reviews / vol. 27, 2013. - pp. 435-444.
2. Usov S.V. Elektricheskaya chast elektrostantsiy [Electrical power] / Pod red. S.V. Usova. - L.: Energoatomizdat, 1987. - 616 p.
3. Sichenko V.G. Anallz vplivu sonyachnoYi generatsiyi na robotu tyagovih pldstantsiy elektrifikovanih zaliznits [Analysis of the impact of solar generation in the work of traction substations of electrified railways]./ Sichenko V.G., Bondar O.I., Prikhoda Svltotehnika ta elektroenergetika #1(41). 2015. - 10-17 pp.
4. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok [Rules for Electrical Installation]. Chetverte vidannya, pereroblene y dopovnene - H.: Vid-vo «Fort», 2011.— 736 p.
5. Rukovodyaschie ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya i vyiboru elektrooborudovaniya [Guidelines for the calculation of short circuit current and the choice of electrical equipment]/Pod red. B.N. Neklepaeva.-M.:Izd-vo NTs ENAS, 2001. -152 p.
6. Lenkov Yu.A. Vyibor kommutatsionnyih apparatov i tokoveduschih chastey raspredelitelnyih ustroystv elektricheskikh stantsiy i podstantsiy. [The choice of switching devices and live parts of electrical switching stations and substations] / Lenkov Yu.A., Hozhin G.H. Uchebnoe posobie. – Pavlodar: PGU, 2002. – 210 p.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

Дослідження вмикаючої здатності вимикачів тягових підстанцій при приєднанні СЕС та перевірка вже встановлених вимикачів на термічну та динамічну стійкість. Для вирішення поставленого завдання були використані основні рівняння стійкості вимикачів. Оцінка вмикаючої здатності обладнання здійснювалася в результаті аналізу розрахунків струмів короткого замикання підстанції. Внаслідок проведених досліджень було проведено розрахунок та проаналізовано термічну та динамічну стійкість вимикачів та надано висновки по спрацюванню вимикачів та максимальної потужності можливої приєднаної СЕС. Вперше проводилося дослідження вмикаючої здатності вимикачів тягових підстанцій при приєднанні СЕС до шин 10, 35, 110 та 27,5 кВ тягової підстанції.

Ключові слова: сонячна електростанція, електрифіковані залізниці, тягова підстанція, високовольтні вимикачі, термічна стійкість, динамічна стійкість, струми короткого замикання.

УДК 621.331.3

М.С. ПРИХОДА (ДНУЖТ)

Кафедра «Електроснабження залізничних доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 11, ел. пошта: ms_estimate@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-4122-3193

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПРИ ПРИСОЕДИНЕНИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Исследования отключающей способности выключателей тяговых подстанций при присоединении СЭС и проверка уже установленных выключателей на термическую и динамическую устойчивость. Для решения поставленной задачи были использованы основные уравнения устойчивости выключателей. Оценка отключающей способности оборудования осуществлялась в результате анализа расчетов токов короткого замыкания подстанции. Вследствие проведенных исследований был проведен расчет и проанализированы термическую и динамическую устойчивость выключателей и предоставлены выводы по срабатыванию выключателей и максимальной мощности возможной присоединенной СЭС. Впервые проводилось исследование отключающей способности выключателей тяговых подстанций при присоединении СЭС к шинам 10, 35, 110 и 27,5 кВ тяговой подстанции.

Ключевые слова: солнечная электростанция, электрифицированные железные дороги, тяговая подстанция, высоковольтные выключатели, термическая устойчивость, динамическая устойчивость, токи короткого замыкания.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.331.3

M. PRIKHODA (DNURT)

Department of Power supply of railways, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian Street. Lazarian, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, Tel. +38 (056) 793 19 11, e-mail: ms_estimate@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-4122-3193

STUDYING OF THE BREAKING CAPACITY OF SWITCHING EQUIPMENT OF TRACTION SUBSTATION UPON ACCESSION SOLAR POWER STATION

The breaking capacity of switch of traction substation upon accession solar power station will be studied. The existing switches will be checked for thermal and dynamic stability. Basic equations of stability switches were used for solving this problem. Estimation of the equipment breaking capacity was done like a result of the analyze of the calculation of short-circuit currents. As a result of the research, calculating and analyze of the thermal and dynamic stability of switches were done. Conclusions as compared of switches and the maximum power of the accession solar power station were received. The studying of the breaking capacity of switches of traction substations upon accession solar power station to the busline 10, 35, 110 and 27.5 kV of the traction substation was done for the first time.

Keywords: solar power; electrified railways; traction substations; high-voltage switches; thermal stability; dynamic stability; short circuit currents.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

Ю. Л. САЕНКО (ГВУЗ «ПГТУ»), А. С. ПОПОВ (ПАО «ДОНБАССЭНЕРГО», СБТЭС)

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская 7, г. Мариуполь, Украина, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Публичное акционерное общество «Донбассэнерго», Старобешевская тепловая электрическая станция, ул. Станционная 1, пгт. Новый Свет, Старобешевский район, Донецкая обл., Украина, 87230, тел.: (06253) 7-22-78, e-mail: artempopov9@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-1131-0568

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТУРЕ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СЕТЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС

Постановка проблемы

Основная доля потребителей собственных нужд тепловых электростанций (ТЭС) представляет собой асинхронные двигатели напряжением 6(10) кВ с короткозамкнутым ротором. Доля синхронных двигателей незначительна, в основном они используются в качестве приводных механизмов мельниц. Типовая схема питания сети собственных нужд блочных ТЭС с мощностью трансформатора собственных нужд 25-63 МВА приведена на рис. 1, что соответствует единичной мощности генераторов 200-1200 МВт [1].

При наличии генераторного выключателя пуск агрегатов собственных нужд при запуске энергоблока осуществляется от трансформатора собственных нужд ($T_{\text{раб}}$). В противном случае запуск агрегатов осуществляется от пускорезервного трансформатора ($T_{\text{рез}}$). Наличие расщепленной обмотки у трансформаторов собственных нужд (ТСН) существенно повышает эксплуатационную надежность, поскольку при коротких замыканиях на одной секции напряжение на другой снижается не более чем на 10%, что практически исключает опрокидывание двигателей [1].

При расщепленной обмотке ТСН секции LO1 и LO2 электрически не связаны. Токи однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в данных сетях зачастую не превышают 10 А. Исключения составляют сети, от которых питаются удаленные распределительные пункты багерных или компрессорных станций, что в итоге может увеличить ток ОЗЗ на 5-7 А. Величина тока ОЗЗ будет выше в случае использования ТСН без расщепленной обмотки, поскольку в таком случае секции LO1 и LO2 будут гальванически связаны между собой.

Нейтраль сети собственных нужд ТЭС зачастую изолирована. Согласно правил устройства электроустановок защита от ОЗЗ действует на отключение электродвигателей мощностью 2 МВт и выше при токе ОЗЗ 5 А и более, а также

на электродвигателях меньшей мощности при токах ОЗЗ более 10 А. На практике зачастую защиту на отключение выполняют при токе ОЗЗ выше 5 А, что позволяет существенно снизить разрушающее воздействие замыкания на двигатель и минимизировать объемы разрушений.

Опыт эксплуатации данных сетей показал, что наименьшую электрическую прочность имеют высоковольтные двигатели, повреждение которых чаще всего начинается с повреждения изоляции одной фазы на землю, т.е. с ОЗЗ.

Особую опасность представляют неустойчивые замыкания, при которых дуга попеременно загорается и гаснет. В такой ситуации емкость нулевой последовательности сети попеременно разряжается и дозаряжается, возникающие при этом переходные процессы, накладываясь на ЭДС источника питания, создают опасные дуговые перенапряжения. Для повышения эксплуатационной надежности сетей собственных нужд следует иметь представление о длительности и кратности дуговых перенапряжений, а также решить вопрос согласования этих перенапряжений с уровнем изоляции сети.

Анализ последних исследований и публикаций

На сегодняшний день математическое моделирование переходных процессов достаточно распространено, поэтому в существующей научно-технической литературе данному вопросу посвящено значительное количество публикаций. Работы авторов [2] посвящены исследованию процессов дуговых ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. Результаты исследований показывают, что кратность дуговых перенапряжений при изолированной нейтрали может составлять $3,5U_{\phi}$ и выше. Применение резистивной нейтрали позволяет существенно снизить дуговые перенапряжения до безопасной величины $2-2,2U_{\phi}$.

© Саенко Ю. Л., Попов А. С., 2015

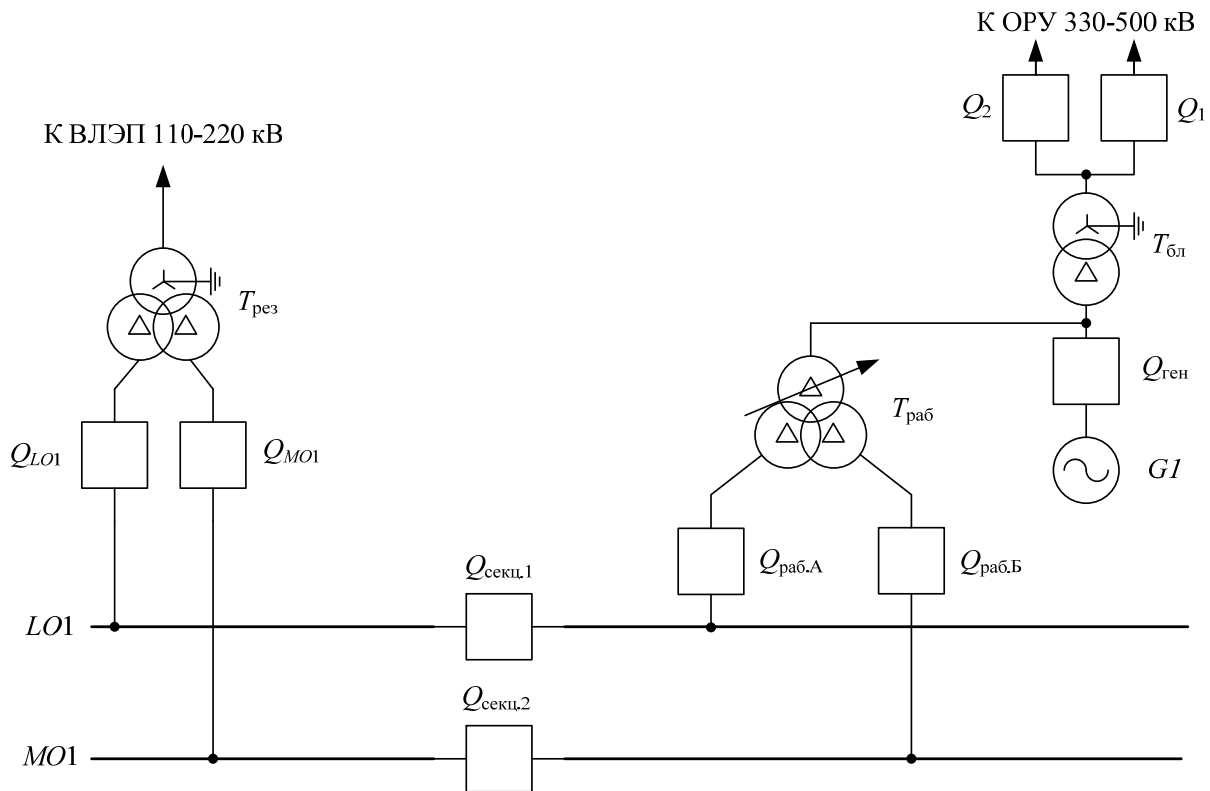


Рис. 1. Схема питания сети собственных нужд ТЭС

В работах авторов [3] исследованы феррорезонансные перенапряжения в контуре нулевой последовательности сетей с изолированной нейтралью. Согласно данным математического моделирования кратности феррорезонансных перенапряжений могут составлять $2U_\phi$ и выше, что с учетом длительности данных процессов представляет серьезную угрозу для изоляции сети. Особую опасность представляют субгармонические феррорезонансные процессы (ФРП), при которых возможны массовые выходы из строя ТНКИ и ложная работа защит от ОЗЗ.

На сегодняшний день развито научное направление, объединяющее математическое моделирование переходных процессов и совершенствование алгоритмов работы устройств релейной защиты. В работах [4, 5] результаты математического моделирования использованы для обучения и тестирования устройств релейной защиты, а также для выявления режимов, в которых защиты действует некорректно. При комплексном подходе к подобному способу тестирования устройств релейной защиты в математической модели должны быть корректно учтены параметры измерительных трансформаторов тока и напряжения [6]. Особое внимание следует уделить частотным характеристикам измерительных трансформаторов [7]. Поскольку переходные процессы в контуре нулевой последовательности развиваются в частотном

диапазоне единицы-десятки кГц, поэтому проявление нелинейностей в частотных характеристиках может оказать существенное влияние на работу релейной защиты.

Не смотря на значительное число публикаций в данной области существующим математическим моделям присущи некоторые недостатки, снижающие точность и достоверность полученных результатов. К таким относятся неточный учет нелинейных свойств трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ), а именно определение вебер-амперной характеристики расчетным путем; пренебрежение случайным характером заземляющей дуги, неучет места замыкания по длине кабеля и др.

Цель

Целью статьи является математическое моделирование переходных процессов в сети с изолированной нейтралью с учетом экспериментально определенных параметров ТНКИ, случайного характера заземляющей дуги, а также исследование поведения направленной защиты от ОЗЗ при дуговых замыканиях на землю.

Изложение основного материала

Моделирование переходных процессов в контуре нулевой последовательности позволяет определить уровень перенапряжений в зависимости от места ОЗЗ, оценить влияние таких

факторов как параметры сети, место замыкания на землю, режим горения дуги на кратности перенапряжений без прибегания к мониторингу переходных процессов в действующей сети. В данной работе моделирование выполнено в среде MATLAB/Simulink, в качестве исходной схемы выбрана сеть 6 кВ с изолированной нейтралью и трансформаторами напряжения контроля изоляции типа НТМИ-6-66.

Схема замещения сети приведена на рис. 2. Система представлена тремя симметричными источниками ЭДС за активным сопротивлением и индуктивностью источника $R_{ист}$ и $L_{ист}$; ТНКИ активным сопротивлением обмотки высокого напряжения (ВН) $R_{ВН}$ и результирующей нелинейной индуктивностью намагничивания $L_{\mu}(i)$; кабельная линия учтена серией последовательных Т-образных звеньев, что необходимо для приближенного учета распределенности параметров и места ОЗЗ; ключ K и линейное сопротивление R_d моделируют перемежающуюся дугу.

Вебер-амперная характеристика ТНКИ определена экспериментально путем разряда конденсатора на основную вторичную обмотку трансформатора [8]. Полученная кривая намагничивания приведена на рис. 3.

Точный учет нелинейных свойств ТНКИ весьма важен при исследовании переходных процессов в контуре нулевой последовательности. Во-первых, это позволяет исследовать ФРП и эффективность мер их гашения. Во-вторых, при повышении фазных напряжений проводимость ТНКИ существенно увеличивается, поэтому при дуговых перенапряжениях свободные заряды стекают через заземленные обмотки ВН измери-

тельных трансформаторов, тем самым снижая перенапряжения. Неучет данных нелинейных проводимостей приводит к завышенным кратностям дуговых перенапряжений при расчетах.

Учет линии электропередачи цепочкой Т-образных участков позволяет учесть место замыкания (начало или конец кабеля, ОЗЗ в двигателе и т.д.), что также во многом определяет кратности дуговых перенапряжений. При значительной удаленности места ОЗЗ от источника питания активное сопротивление в цепи источник – место повреждения демпфирует переходные процессы ОЗЗ, поэтому результирующие кратности перенапряжений снижаются. При некотором критическом активном сопротивлении в цепи ОЗЗ переходный процесс дугового замыкания может иметь апериодический характер, кратности перенапряжения в этом случае будут минимальными. Поскольку частота свободных составляющих при дуговых ОЗЗ колеблется в диапазоне от единиц до десятков кГц, дополнительный демпфирующий эффект на перенапряжения обусловлен поверхностным эффектом в линии и увеличением ее активного сопротивления [9].

Рассмотрим особенности возбуждения и протекания ФРП. Толчком к возникновению феррорезонанса служит появление различного рода несимметрии в контуре нулевой последовательности. К таковым относят ОЗЗ и однофазные дуговые замыкания (ОДЗ), включение или отключение участка сети, включение ТНКИ, включение ненагруженных шин с ТНКИ, внешнее перенапряжение.

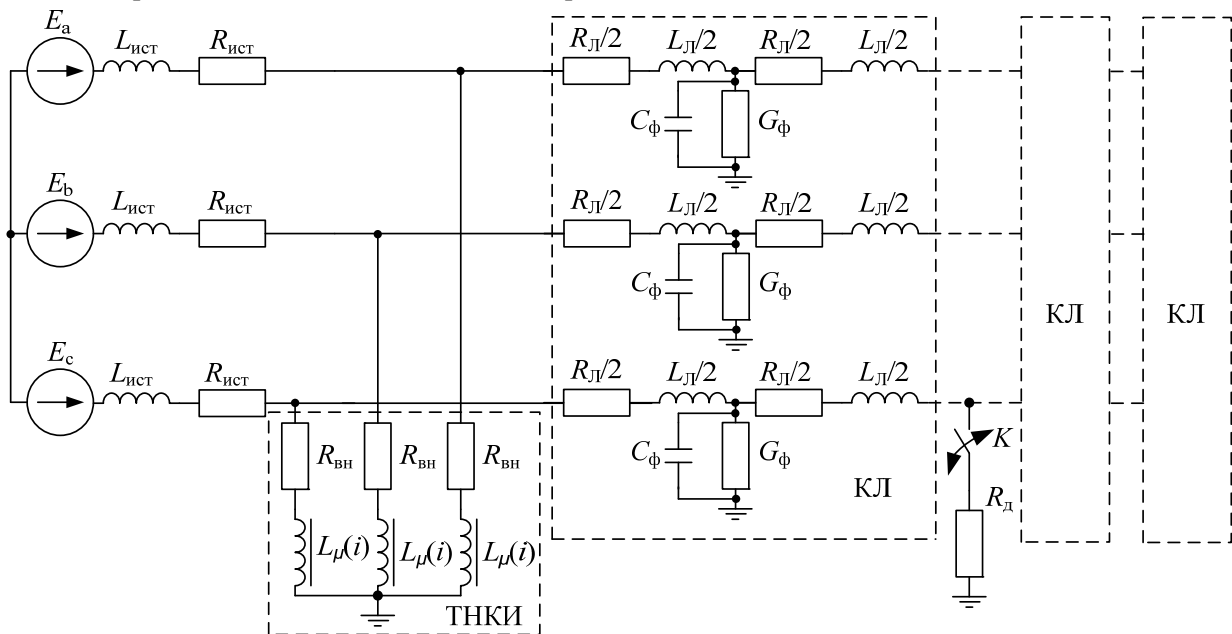


Рис. 2. Схема замещения исследуемой сети

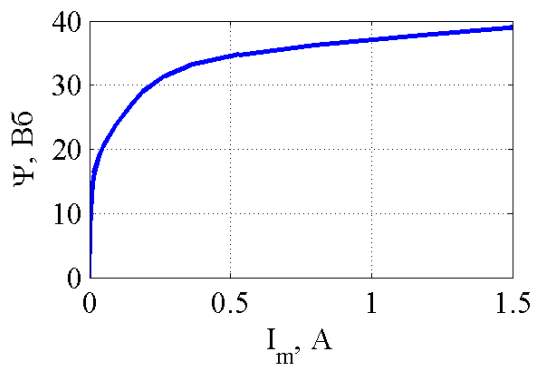


Рис. 3. Вебер-амперная характеристика ТН типа НТМИ-6

Все вышеперечисленные режимы приводят к появлению напряжения смещения нейтрали и избыточного заряда на емкости нулевой последовательности сети. С момента исчезновения несимметрии в контуре нулевой последовательности сети (например, после самоустранения ОЗЗ) возникает процесс разряда емкости сети через активную проводимость изоляции сети на землю и заземленные обмотки ВН ТНКИ. Пример незатухающего обмена энергией между емкостью нулевой последовательности сети и нелинейной индуктивностью ТНКИ приведен на рис. 4, на котором изображены расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН ТНКИ для случая самоустранения дугового замыкания на землю. Данный случай относится к субгармоническому ФРП на частоте 25 Гц и является наиболее распространенным [3].

Опасность длительного субгармонического ФРП заключается в воздействии перенапряжений на изоляцию сети (кратность порядка $1,8 U_{\phi}$), а также протекании сверхтоков в обмотке ВН ТНКИ и последующем его повреждении.

Расчеты показали, что область устойчивого субгармонического ФРП при одном ТНКИ типа НТМИ-6 заключена в диапазоне изменения фазной емкости сети 0,085-0,62 мкФ, что соответствует емкостному току ОЗЗ 0,27-2 А. Увеличение числа параллельно работающих ТНКИ пропорционально расширяет область существования феррорезонанса, поэтому при проектировании следует использовать трансформаторы напряжения с заземленной обмоткой ВН только при необходимости. На рис. 5 приведена зависимость области существования устойчивого субгармонического феррорезонанса от количества параллельно работающих ТНКИ.

Стоит отметить, что развитие ФРП также возможно на промышленной частоте и на высших гармонических составляющих [10]. Данные случаи наиболее характерны для сети с суммарной фазной емкостью на землю 0,08 мкФ и менее, что соответствует емкости ненагруженных шин и оборудования или непротяженной воздушной сети. Кратность феррорезонансных перенапряжений при этом оказывается выше, чем при субгармонических ФРП. В тоже время условия гашения такого феррорезонанса оказываются более легкими, поскольку активная мощность, которую следует ввести в контур нулевой последовательности для срыва колебаний, оказывается ниже, чем для случая субгармонического ФРП [10].

На рис. 6 приведены расчетные кривые фазных напряжений при включении ненагруженной секции шин с ТНКИ. Суммарная фазная емкость сети составила 0,08 мкФ. ФРП развивается на частоте 150 Гц, действующие значения токов в обмотке ВН ТНКИ не при этом превышают 50 мА, что не представляет опасности для ТНКИ.

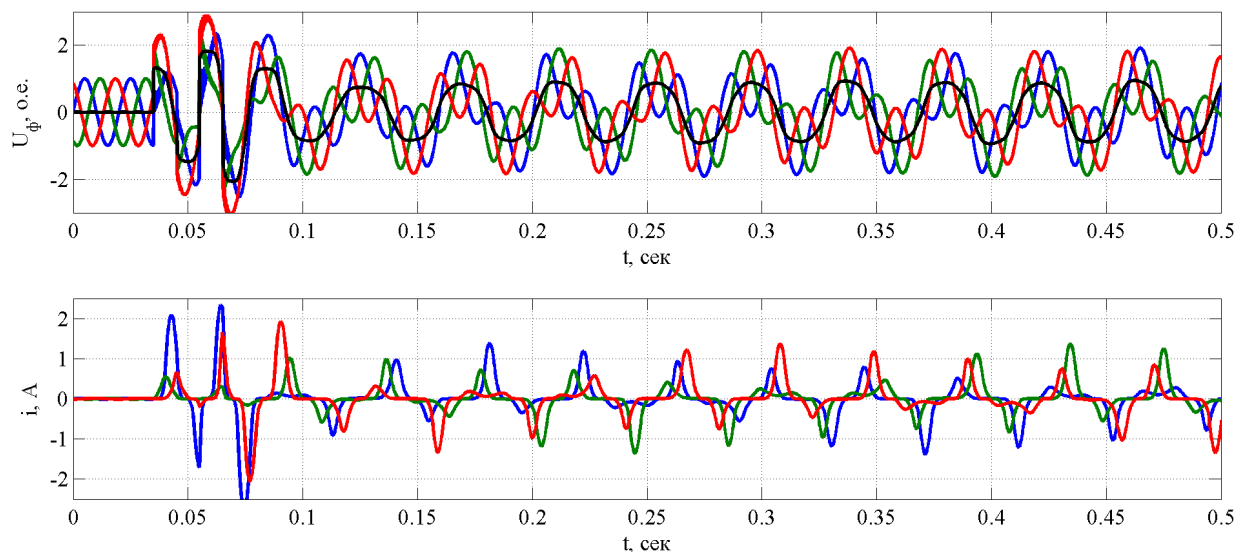


Рис. 4. Расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН ТНКИ при ФРП, возникшем в результате самоустранения ОЗЗ

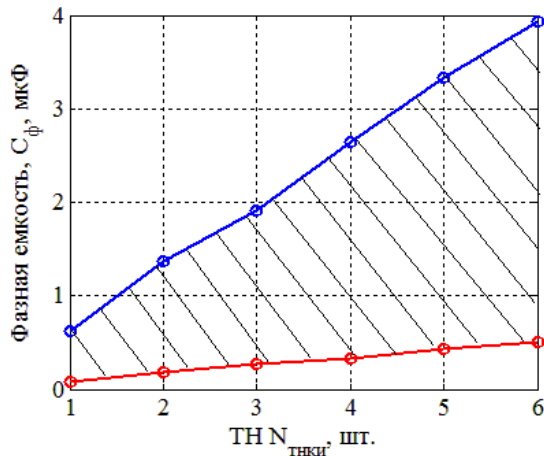


Рис. 5. Название рисунка

Как видно из результатов, кратности перенапряжений в этом случае составляют $2,36U_{\phi}$. Стоит отметить, что при моделировании неучтена вторичная нагрузка ТНКИ, которая оказывает демпфирующий эффект на ФРП. Это в первую очередь относится к феррорезонансам, развивающимся на частотах 50 Гц и выше. При нагрузке 100 ВА и более феррорезонансы на частотах 50 Гц и выше становятся затухающими. Опасность ФРП для сетей собственных нужд поясняется тем, что ложное напряжение нулевой последовательности заставляет оперативный персонал выполнять поочередные отключения фидеров 6 кВ с целью определения поврежденного присоединения. Распространены случаи, когда отключение одного из фидеров приводит к нарушению феррорезонансных условий и исчезновению напряжения нулевой последовательности. В результате данное присоединение ложно считается поврежденным. Также известны случаи ложной работы направленных и ненаправленных защит от ОЗЗ при существовании ФРП.

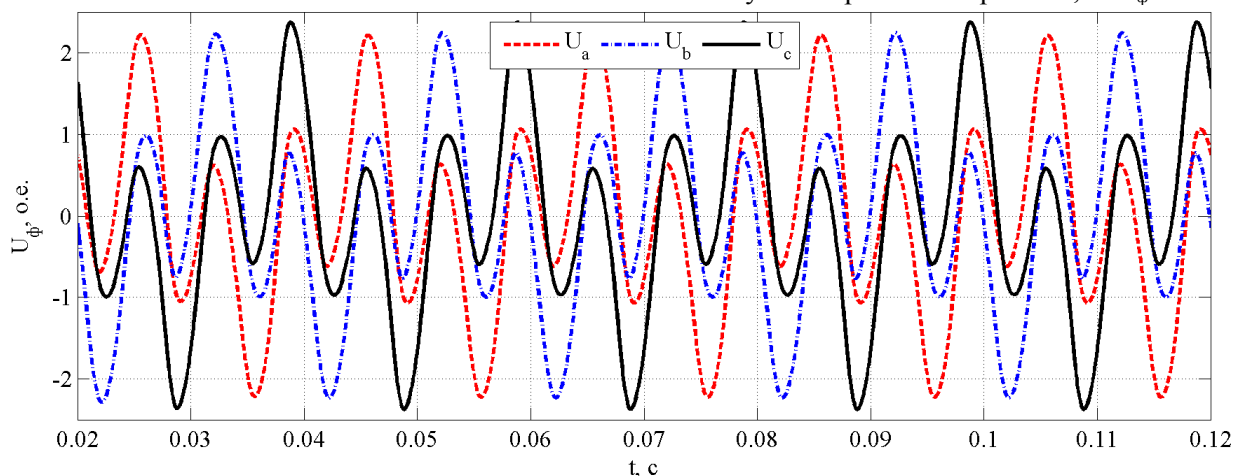


Рис. 6. Расчетные кривые фазных напряжений при ФРП на частоте 150 Гц, возникшем при включении ненагруженных шин с ТНКИ

Рассмотрим особенности протекания процессов ОДЗ в сетях собственных нужд ТЭС. Как было отмечено выше, токи ОЗЗ в таких сетях зачастую не превышают 10 А. Процесс ОЗЗ чаще всего начинается с неустойчивого, так называемого дугового замыкания. В процессе зажигания погасания дуги в контуре нулевой последовательности возникают переходные процессы заряда разряда емкости сети, которые накладываясь на ЭДС источника питания, формируют результирующие перенапряжения.

Анализ опытных осциллограмм процессов ОДЗ в сети с изолированной нейтралью и кабелями с ПВХ изоляцией показал, что гашение тока ОЗЗ происходит при третьем, реже при втором переходе высокочастотной составляющей тока нулевой последовательности через ноль. Напряжение пробоя изменяется случайным образом, причем, чем оно выше, тем выше кратность дуговых перенапряжений. В разработанной математической модели стохастическое поведение заземляющей дуги учтено случайным изменением напряжения пробоя, закон распределения которого принят нормальным.

На рис. 7 приведена расчетная кривая фазных напряжений и тока ОЗЗ при ОДЗ. Параметры закона распределения напряжения пробоя: математическое ожидание напряжения пробоя $M(U_{пр}) = 0,8U_{\phi}$, среднеквадратическое отклонение напряжения пробоя $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$. Пробои происходят один раз за полупериод. Расчет переходных процессов при вариации параметров закона распределения напряжения пробоя показал, что результирующие кратности перенапряжения при прочих неизменных параметрах сети пропорциональны напряжению пробоя. Максимальные кратности перенапряжений, полученные при моделировании, составили $3,2U_{\phi}$, и соответствуют напряжению пробоя $1,52 U_{\phi}$.

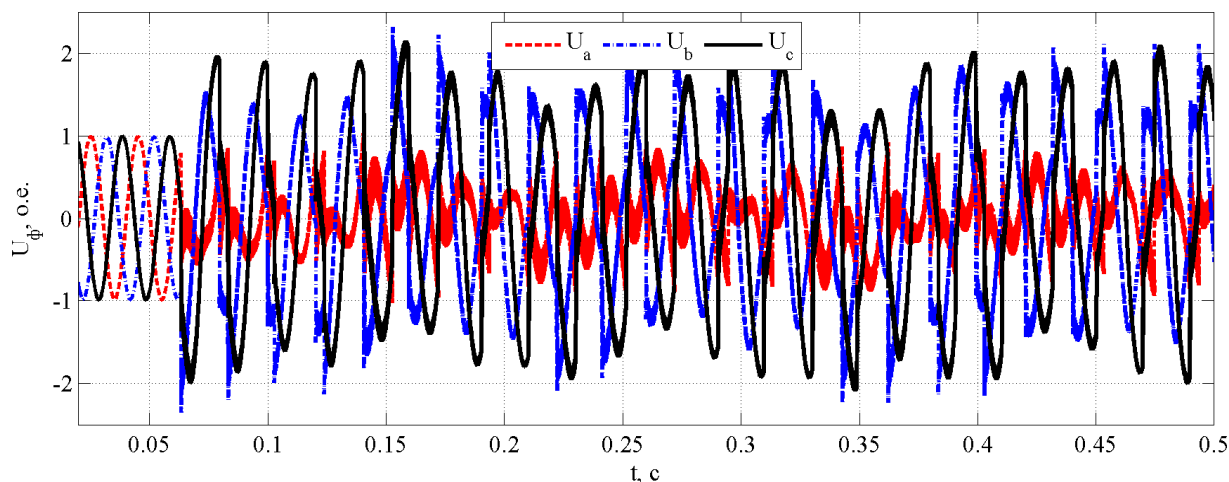


Рис. 7. Расчетные кривые фазных напряжений при ОДЗ с учетом случайного изменения напряжения пробоя

Кратности перенапряжений оказываются тем ниже, чем выше активное сопротивление в цепи от источника до места ОЗЗ и хуже состояние изоляции сети (выше активная проводимость сети на землю G_{ϕ}).

На рис. 8 приведена эмпирическая плотность распределения вероятностей (а) и функция распределения вероятностей (б) кратности перенапряжений при $M(U_{пр}) = 0,8U_{\phi}$ и $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$. Как видно из результатов, закон распределения кратности перенапряжений также оказывается нормальным. При этом с вероятностью 95% кратность перенапряжений не превысит $2,23U_{\phi}$.

На рис. 9 приведена опытная осциллограмма тока нулевой последовательности при перемежающемся ОДЗ в сети собственных нужд ТЭС, которое перешло в междуфазное короткое замыкание с последующим повреждением и отключением двигателя.

Для защиты от перемежающихся ОДЗ разработан специальный вид защиты INTRPTEF1 (шифр по стандарту МЭК 61850). Однако не все терминалы обладают данной защитой. Классическая токовая ненаправленная защита не почувствовала неустойчивое замыкание (см. рис. 9), что привело к повреждению двигателя. Рассмотрим поведение направленной защиты от ОЗЗ DEFxPDEF терминала фирмы ABB серии REM 615 при перемежающемся ОДЗ. Как известно, ток нулевой последовательности поврежденного присоединения при ОЗЗ течет от шин к кабелю, ток нулевой последовательности неповрежденного фидера течет от кабеля к шинам. На этом признаке построен алгоритм определения поврежденного присоединения. Из всех существующих алгоритмов измерения тока и напряжения нулевой последовательности для направленной защиты от ОЗЗ рекомендуется применять режим Фурье.

На рис. 10 (а) приведены расчетные кривые фазных углов напряжения нулевой последовательности и токов нулевой последовательности поврежденного и неповрежденных фидеров при перемежающемся ОДЗ (присоединение 3 является поврежденным). На рис. 10 (б) приведена векторная диаграмма, соответствующая рис. 10 (а), при этом значения амплитуд и фаз получены как средние значения на расчетном интервале 1 с.

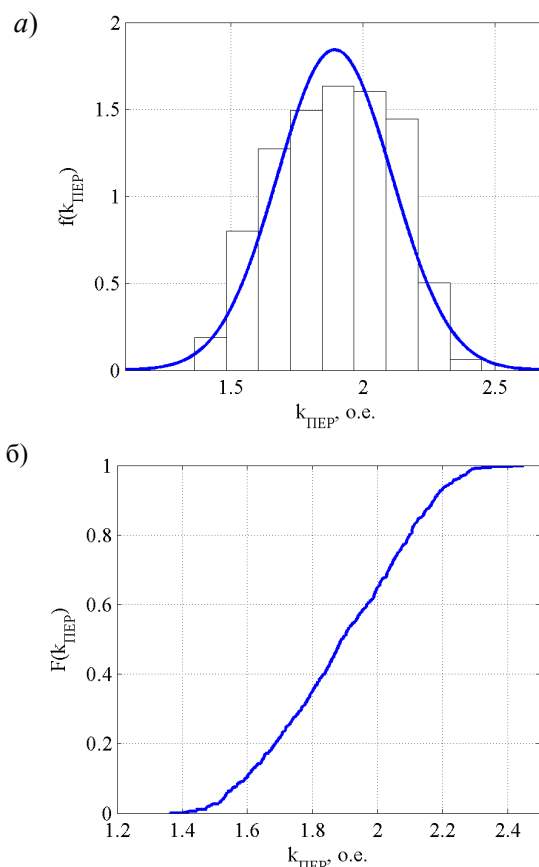


Рис. 8. Плотность распределения вероятностей (а) и функция распределения вероятностей (б) кратностей перенапряжений при ОДЗ с параметрами $M(U_{пр}) = 0,8U_{\phi}$ и $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$

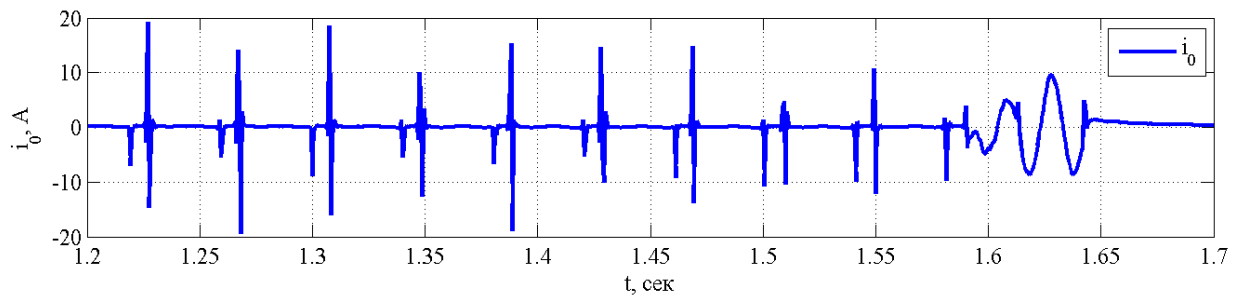
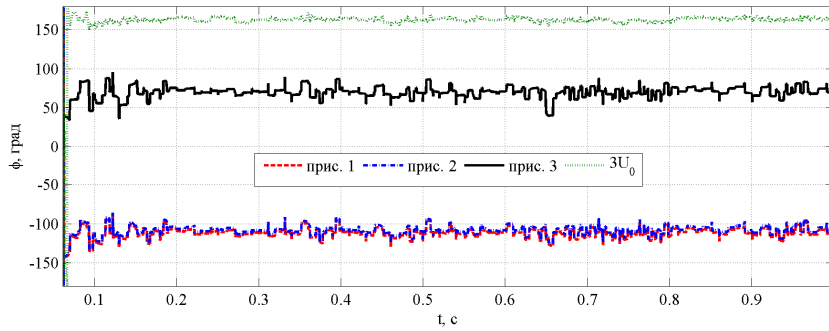
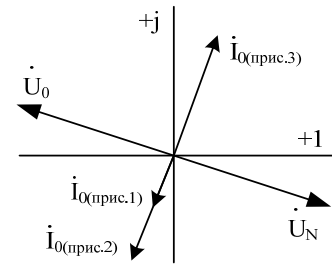


Рис. 9. Опытная осциллограмма тока нулевой последовательности при перемежающемся ОДЗ, перешедшем в междуфазное короткое замыкание



а)



б)

Рис. 10. Временные диаграммы изменения фаз напряжения и токов нулевой последовательности поврежденно-го и неповрежденных присоединений при ОДЗ (а), а также векторная диаграмма для данного случая (б)

Как следует из результатов, на всем интервале перемежающегося ОДЗ ток нулевой последовательности поврежденного фидера отстает от напряжения нулевой последовательности, в то время как токи нулевой последовательности неповрежденных фидеров опережают напряжение нулевой последовательности.

Таким образом, при корректной настройке направленной защиты от ОЗЗ она может эффективно работать при неустойчивых замыканиях. При этом стоит отметить, что при моделировании трансформаторы тока нулевой последовательности и ТНКИ приняты идеальными, в реальности же вносимые ими искажения могут привести к некорректной работе защиты. Поэтому в качестве перспективного направления дальнейших исследований в данной области следует считать исследование динамических режимов функционирования устройств релейной защиты с учетом нелинейных свойств измерительных трансформаторов.

Выводы

1. В сетях собственных нужд ТЭС развитию аварийной ситуации зачастую предшествует появлению несимметрии в контуре нулевой последовательности. К таковым относится появление феррорезонансных явлений и процессов

ОДЗ. Расчеты показали, что область существования устойчивого феррорезонанса пропорциональна количеству параллельно работающих ТНКИ, причем на один трансформатор приходится фазная емкость 0,085-0,62 мкФ, что соответствует емкостному току ОЗЗ 0,27-2 А.

2. Исследования с учетом случайного характера заземляющей дуги показали, что кратность дуговых перенапряжений в значительной мере определяется напряжением пробоя, причем чем выше $U_{пр}$, тем выше перенапряжения. При нормальном законе распределения напряжения пробоя кратность дуговых перенапряжений также нормально распределена. Значительное демпфирующее влияние на кратности перенапряжений оказывает активное сопротивление в цепи от источника питания до места ОЗЗ, поэтому при значительной удаленности места ОЗЗ от источника кратность дуговых перенапряжений может не превышать $2U_{ф}$.

3. Результаты математического моделирования переходных процессов могут быть использованы для оценки корректности работы устройств релейной защиты на стадии их разработки без применения натуральных экспериментов. Данное направление открывает широкие перспективы для совершенствования алгоритмов работы устройств релейной защиты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абассова Э. М. Собственные нужды тепловых электростанций / Э. М. Абассова, Ю. М. Голоднов, В. А. Зильберман, А. Г. Мурзаков. М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 272 с.
2. Сивокобыленко В. Ф. Анализ процессов дуговых замыканий на землю в сетях собственных нужд ТЭС и АЭС / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев, Махинда Сильва // 36. наук. пр. ДонДТУ, Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонДТУ. – 2000. – Випуск 17. – С. 129 – 133.
3. Журахівський А. В. Ферорезонансні процеси в електромережах 10 кВ з різнотипними трансформаторами напруги / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк // Технічна електродинаміка. – 2010. – №2. – С. 73 – 77.
4. Kezunovic M. Modeling, developing and testing protective relays using MATLAB, programmable relays and digital simulators / M. Kezunovic, B. Kasztenny, Z. Galijasevic // Third International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS). Vasteras, Sweden. – 1999. – pp. 1 – 6.
5. Kezunovic M. User-friendly, open-system software for teaching protective relaying application and design concepts / M. Kezunovic // IEEE Transactions on Power Systems. – No. 3. – 2003. – pp. 986 – 992.
6. Tziouvaras D. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers / D. Tziouvaras, McLaren, P. Alexander, G. Dawson // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 15, Jan. – No. 1. – 2000. – pp. 62 – 72.
7. Eming L. On-line identification of frequency response of current transformers using a correlation method / L. Eming, J.M.K. MacAlpine, L. Yanbing // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Hong Kong, China. – 1997. – pp. 2701 – 2704.
8. Саенко Ю.Л. Математические аспекты выбора емкости конденсатора для определения вебер-амперной характеристики измерительных трансформаторов напряжения / Ю.Л. Саенко, А.С. Попов // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. Збірник наукових праць. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2011. – №2 (23). – С. 253 – 258.
9. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. – М.: Энергия. – 1971. – 152 с.
10. Саенко Ю. Л. Определение условий гашения феррорезонансных колебаний в сетях с изолированной нейтралью / Ю. Л. Саенко, А. С. Попов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2014. – №1(84). – С. 15 – 22.

Поступила в печать 21.05.2015.

Внутренний рецензент Кузнецов В. Г.

© Саенко Ю. Л., Попов А. С., 2015

REFERENCES

1. Abassova E.M., Golodnov Yu. M., Zilberman V. A., Murzakov A. G. Sobstvennye nuzhdy teplovykh elektrostansiy [Own needs of the thermal power stations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 272 p.
2. Sivokobylenko V. F., Lebedev V. K., Mahinda Silva. Analiz protsessov dugovykh zamykaniy na zemlyu v setyakh sobstvennykh nuzhd TES i AES [Analysis of the processes arc earth fault in the networks own needs TPP and NPP]. Zbirnyk naukovykh prats DonNTU, Seriya «Elektrotehnika i energetyka» [Collection of scientific papers DonNTU, series "Electrical and Power Engineering"], 2000, No. 17, pp. 129 – 133.
3. Zhurakhivskyi A. V., Kens Yu. A., Yatseyko A. Ya., Masliak R. Ya. Ferorezonansni protsesy v elektychnykh merezhakh z riznotypnymi trasformatoramy naprugy [Ferorezonance processes in electrical networks 10 kV with different types of voltage transformers]. Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics], 2010, No. 2. pp. 73 – 77.
4. Kezunovic M. Kasztenny B., Galijasevic Z. Modeling, developing and testing protective relays using MATLAB, programmable relays and digital simulators. Third International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS). Vasteras, Sweden, 1999, pp. 1 – 6.
5. Kezunovic M. User-friendly, open-system software for teaching protective relaying application and design concepts. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, No. 3, pp. 986 – 992.
6. Tziouvaras D., McLaren, Alexander P., Dawson G. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, Vol. 15, No. 1. pp. 62 – 72.
7. Eming L. MacAlpine J.M.K., Yanbing L. On-line identification of frequency response of current transformers using a correlation method. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Hong Kong, China, 1997, pp. 2701 – 2704.
8. Sayenko Yu. L., Popov A. S. Matematicheskie aspekty vybora emkosti kondensatora dlya opredeleniya veber-ampernoy kharakteristiki izmeritelnykh transformatorov napryazheniya [Mathematical aspects of choosing the capacity for determination saturation characteristic of measuring voltage transformers]. Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky. Zbirnyk naukovykh prats [Collection of scientific papers "Pryazovskiy State Technical University", series "Technical science"], 2011, No. 2, pp. 253 – 258.
9. Lihachov F. A. Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytralyu i kompensatsiey emkostnykh tokov [Earth faults in networks with insulated neutral and capacitive current compensation]. Moscow, Energiya Publ., 1971, 152 p.
10. Sayenko Yu. L., Popov A. S. Opredelenie usloviy gasheniya ferorezonansnykh kolebaniy v setyakh s izolirovannoy neytralyu [Determination the conditions of damping the ferorezonance oscillations in networks with insulated neutral point]. Visnyk Kremenchutskogo natsionalnogo universytetu imeni Mykhayla Ostrogradskogo [Scientific Journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University"], 2014, No. 1, pp. 15 – 22.

Внешний рецензент Денисюк С. П.

Надежность работы сетей собственных нужд тепловых электростанций определяет работоспособность сложного технологического цикла, которым является производство электроэнергии. Аварийное отключение механизмов собственных нужд приводит к снижению мощности, выдаваемой в сеть генераторами, а иногда требует полного сброса нагрузки и отключения генератора. Основными потребителями собственных нужд являются высоковольтные двигатели, повреждение которых чаще всего начинается с возникновения однофазного замыкания на землю.

Целью работы является исследование переходных процессов в контуре нулевой последовательности сетей собственных нужд тепловых электростанций, выявление особенностей протекания данных процессов, факторов, влияющих на результирующие кратности дуговых перенапряжений. Для исследования переходных процессов использована математическая модель, созданная в пакете MATLAB/Simulink. Параметры измерительного трансформатора напряжения (ТН) определены экспериментально.

Результаты исследований показали, что в сетях с током замыкания на землю порядка 5 А возможно возникновение феррорезонансных явлений. Область существования устойчивого феррорезонанса определяется количеством параллельно работающих ТН. При этом на один ТН зона существования субгармонического феррорезонанса соответствует емкости сети 0,085-0,62 мкФ. Исследованы процессы однофазного дугового замыкания с учетом стохастического поведения заземляющей дуги. Доказано, что кратность дуговых перенапряжений пропорциональна напряжению пробоя. При нормальном законе распределения напряжения пробоя кратности перенапряжений также распределены нормально. Исследованы режимы работы микропроцессорной направленной защиты от однофазных замыканий на землю в режиме дугового замыкания. Доказано, что при корректной настройке данной защиты она способна действовать селективно при неустойчивых замыканиях. Перспективным направлением дальнейших теоретических и практических исследований в этой области является экспериментальное определение частотных характеристик измерительных трансформаторов тока и напряжения и исследование переходных процессов с учетом нелинейных свойств измерительных трансформаторов.

Ключевые слова: феррорезонанс; контур нулевой последовательности; однофазное замыкание на землю; стохастическое моделирование; спектральный анализ; функция распределения вероятностей; плотность распределения вероятностей.

УДК 621.311

Ю. Л. САЕНКО (ДВНЗ «ПДТУ»), А. С. ПОПОВ (ПАТ «ДОНБАСЕНЕРГО», СБТЭС)

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська 7, м. Маріуполь, Україна, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Публічне акціонерне товариство «ДОНБАСЕНЕРГО», Старобешівська теплова електрична станція, вул. Станційна 1, смт. Новий Світ, Старобешевський район, Донецька обл., Україна, 87230, тел.: (06253)7-22-78, e-mail: artempopov9@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-1131-0568

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОНТУРІ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ МЕРЕЖ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ТЕС

Надійність роботи мереж власних потреб теплових електростанцій визначає працездатність складного технологічного циклу, яким є виробництво електроенергії. Аварійне відключення механізмів власних потреб призводить до зниження потужності, що видається в мережу генераторами, а іноді вимагає повного скидання навантаження і відключення генератора. Основними споживачами власних потреб є високовольтні двигуни, пошкодження яких найчастіше починається з виникнення однофазного замикання на землю.

Метою роботи є дослідження перехідних процесів в контурі нульової послідовності мереж власних потреб теплових електростанцій, виявлення особливостей протікання даних процесів, факторів, що впливають на результируючі кратності дугових перенапруг. Для дослідження перехідних процесів використана математична модель, створена в пакеті MATLAB/Simulink. Параметри вимірювального трансформатора напруги (ТН) визначені експериментально.

Результати досліджень показали, що в мережах із струмом замикання на землю близько 5 А можливе виникнення феррорезонансним явищ. Область існування стійкого феррорезонансу визначається кількістю паралельно працюючих ТН. При цьому на один ТН зона існування субгармонійного феррорезонансу відповідає ємності мережі 0,085-0,62 мкФ. Досліджено процеси однофазного дугового замикання з урахуванням стохастичної поведінки заземлюючої дуги. Доведено, що кратність дугових перенапруг пропорційна напрузі пробоя. При нормальному законі розподілу напруги пробоя кратності перенапруг також розподілені нормально. Досліджено режими роботи мікропроцесорного спрямованого захисту від однофазних замикань на землю в режимі дугового замикання. Доведено, що при правильному налаштуванні даного захисту він здатен діяти селективно при нестійких замиканнях. Перспективним напрямом подальших теоретичних та практичних досліджень у цій галузі є експериментальне визначення частотних характеристик вимірювальних трансформаторів струму та напруги і дослідження перехідних процесів з урахуванням нелінійних властивостей вимірювальних трансформаторів.

Ключові слова: феррорезонанс; контур нульової послідовності; однофазне замикання на землю; стохастичне моделювання; спектральний аналіз; функція розподілу ймовірностей; щільність розподілу ймовірностей.

Внутрішній рецензент Кузнецов В. Г.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

© Саенко Ю. Л., Попов А. С., 2015

UDC 621.311

YU. L. SAYENKO (SHEI «PSTU»), A. S. POPOV (PJSC «DONBASENERGO», SbTPP)

State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Universytetska Str. 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Public joint-stock company «DONBASENERGO», Starobeshivska thermal power plant. Stantsiina Str. 1, urban-type settlement Novyi Svit, Starobeshevskiy district, Donetska region, Ukraine, 87230, tel.: (06253) 7-22-78, e-mail: artempopov9@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-1131-0568

NUMERICAL ANALYSIS OF TRANSIENTS IN THE ZERO SEQUENCE CIRCUIT NETWORKS OF AUXILIARY TPP

The reliability of the network's auxiliary of thermal power plants determines the performance of a complex technological cycle, which is the production of electricity. Emergency turning off of mechanisms of auxiliary reduces the power delivered to the network from generators, and it sometimes requires a full load dropping and turning off of the generator. The main consumers of auxiliary are high-voltage engines, whose damage most frequently begins with the appearance of a single-phase earth fault.

The purpose of the article is a study of transients in the zero sequence circuit networks of auxiliary of thermal power plants, revealing the features of the flow of these processes, the factors affecting the resulting arc overvoltages. In order to study transients it is used the mathematical model created in the package MATLAB/Simulink. Parameters of voltage transformer (VT) are determined experimentally.

The results of studies showed that in networks with earth fault current about 5 A it's possible occurrence of ferroresonance phenomenon. The domain of existence of steady ferroresonance depends by the number of parallel working VT. In this case the domain of existence of subharmonic ferroresonance corresponds to the capacity of network 0,085-0,62 μF related to one VT. The processes of single-phase arc fault taking into account the stochastic behavior of the grounding arc were investigated. It is proved that the frequency rate of arc overvoltages is proportional to breakdown voltage. At the Gaussian distribution of breakdown voltage the frequency rate of arc overvoltages are also distributed Gaussian function. The operation modes of the microprocessor directed protection from single-phase ground fault in the arcing fault mode were investigated. It's proved that the correct setting of this protection is able to act selectively in the unstable faults. Long-term direction of further theoretical and practical research in this area is the experimental determination of the frequency characteristics of the measuring current and voltage transformers and research of transients with the nonlinear properties of the measuring transformers.

Keywords: ferroresonance; the circuit of zero sequence; single phase ground fault; stochastic modeling; spectral analysis; the probability distribution function; probability density function.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

M. O. KOSTIN, A. V. NIKITENKO (DNURT)

Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian, Lazarian Str., 2, office 238, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel. +380563731537, e-mail: nkoston@ukr.net, nikitenko.diit@gmail.com,
ORCID: orcid.org/0000-0002-0856-6397, orcid.org/0000-0002-6426-5097

ENERGY OF STARTING UP TO SPEED OF DC TRAIN

Introduction

The proposed autonomous (off-line) mode of recuperative braking in the articles [1, 2] shows that it is more effective to start up the train using the energy which was stored in the last phase of recuperative braking by on-board supercapacitor storage system (OSSS). First of all, the off-line mode allows to save significant volume of energy for the next phase of traction mode. Secondly, it increases the traffic-capacity of overhead line. But these facts lead to the question: which energy is required to starting up the electric rolling stock (ERS) from zero to some operational speed?

The paper describes the method of energy estimation and shows the results of analysis for DC multiple unit train EPL2T.

Methodology and main formulae for energy estimation

As it was established, at the train starting the energy, which is performed by its traction motors, A_{st} consists of: 1) energy for overcoming the friction A_{fr} in the bearings of wheelpairs; 2) A_{tr} is the energy for overcoming the main forces of the train running resistance; 3) variations of stored the kinetic A_k and the potential A_p energy in the process of train acceleration; 4) ΔA_{em} is the energy of electrical and mechanical losses of system in the process of energy conversion and transmission. Therefore, the energy balance equation of train starting up is

$$A_{st} = A_{fr} + A_{tr} + A_k \pm A_p + \Delta A_{em}. \quad (1)$$

Each component of the equation is explained as follows. Firstly, we consider that the train starting carried on a horizontal straight section of track without rises and falls, so potential energy A_p is absent. The energy sum $A_{fr} + A_{tr}$ is frequently noted like $A_w(V)$. This energy is consumed on overcoming of the total resistance to train motion and is described by next equation:

$$A_w(V) = A_{fr} + A_{tr} = V \cdot t \cdot W = l_{st} \cdot W$$

$$= V \cdot t \cdot W = l_{st} \cdot W, \quad (2)$$

where V is the speed;

t is the time of starting up;

l_{st} is the distance passed in acceleration period;

W is the total resistance to train motion.

The total resistance W consists of the main running resistance W_0 and additional W_{fr} , which is based on the friction forces in the bearings of wheelpairs, so

$$W = W_0 + W_{fr}. \quad (3)$$

The absolute value of the main running resistance W_0 is determined as multiplication of the specific main running resistance w'_0 on the estimated weight of the train $m \cdot g$ [3, 4]:

$$W_0 = w'_0 \cdot m \cdot g, \text{ N}, \quad (4)$$

where m is the weight of the train, t;

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$ is the acceleration of gravity.

Formulae for determination of the specific main running resistance w'_0 are shown in [4] for most common types of main and urban railway electric transport. Generally, the formula can be written such as:

$$w'_0 = a + b \cdot V + c \cdot V^2, \text{ H/kN}, \quad (5)$$

where a, b, c are the coefficients;

V is the train starting up speed, km/h.

The value of the additional running resistance W_{fr} at the moment of train starting up can be calculated using the formula:

$$W_{fr} = W'_{fr} \cdot m \cdot g, \quad (6)$$

where W'_{fr} is the specific additional running resistance which is calculated in accordance with the Rules of Traction Calculations [3]:

$$W'_{fr} = \frac{28}{m_0 + 27}, \quad (7)$$

where m_0 is the physical weight per one axle of rolling stock, t.

In case when the train has different types of carriages and these carriages have different axial load m_0 , the coefficients m_0 and W'_{fr} should be determined for each type of carriage. That is why the resulting running resistivity is calculated by the following formula:

$$W'_{fr} = \frac{\sum W'_{fri} \cdot n_i}{\sum n_i}, \quad (8)$$

where n_i is the quantity of the carriages with similar type;

W'_{fri} is the specific additional running resistance for i -th carriage is calculated by the formula (7).

Theoretical and experimental researches show that in formula (1) the kinetic energy A_k is fundamental like A_{fr} and A_{tr} . As it is known from [4], the kinetic energy which is transferred to the train weight in the process of train starting up from zero to some operational speed is given by:

$$A_k = \frac{m_r \cdot V^2}{2} = \frac{m \cdot (1 + \gamma) \cdot V^2}{2}, \quad (9)$$

where m_r and m are the reduced and physical (calculated) weights of the train respectively, kg; $(1 + \gamma) = 1,08$ is the rotational inertia coefficient [5].

Energy losses ΔA_{em} in traction electrical equipment consist of losses in traction electric motor (TEM), mechanical transmission, wires of power circuit, pulse converter, on-board supercapacitor storage system. The corresponding total power losses determine the efficiency of the relevant units of conversion and transmission system. Therefore, the value ΔA_{em} in the calculations of A_{st} takes into consideration the efficiencies of the next elements: TEM η_{TED} , the pulse converter η_{pc} and OSSS η_{OSSS} .

Abovementioned data determine the energy of train starting up by the expression:

$$A_{st}(V) = \frac{A_w(V) + A_k(V)}{\eta_{TEM} \cdot \eta_{pc} \cdot \eta_{OSSS}}. \quad (10)$$

We obtain an expression of the capacity C of OSSS which is necessary to starting up and accelerate the ERS to some speed.

As it is known, the energy which stored in the electric field of the capacitor is determined by the expression:

$$A_{OSSS} = \frac{C \cdot U_{Cnom}^2}{2}, \quad (11)$$

where U_{Cnom} is the nominal voltage of fully charged capacitors.

It is not recommended to discharge capacitive storage for structural views completely to [6] and it should have some residual charge, so-called "dead volume". Therefore, the total energy of the storage system has two components and equals:

$$A_{OSSS} = A_c + A_d, \quad (12)$$

where A_c is the exchange energy between storage system and traction motors of ERS, A_d is the energy of "dead volume".

The exchange energy can be represented as

$$A_c = \frac{C \cdot (U_c^2 - U_d^2)}{2}, \quad (13)$$

where $U_c^2 - U_d^2$ is the operational voltage range (charge-discharge);

U_c is the voltage of fully charged storage system;

U_d is the voltage of discharged storage system (voltage of "dead volume").

To determine the capacity C by the energy balance of $A_{st}(V)$ and A_c the formulae (10) and (13) are used:

$$\frac{A_w(V) + A_k(V)}{\eta_{TEM} \cdot \eta_{pc} \cdot \eta_{OSSS}} = \frac{C \cdot (U_c^2 - U_d^2)}{2}.$$

Finally, equation above allows to get the final formula:

$$C = \frac{2[A_w(V) + A_k(V)]}{(U_c^2 - U_d^2) \cdot \eta_{TEM} \cdot \eta_{pc} \cdot \eta_{OSSS}}. \quad (14)$$

Using the expressions (10) and (14) we calculate energy for EPL2T starting up and appropriate for this storage system capacity.

Calculation and analysis results of the starting up energy of EPL2T

The multiple unit train EPL2T basically consists of 8 carriages: 2C+ 4M + 2T, i.e. 2 carriages with cabs, 4 motor carriages and 2 intermediate (trailer) carriages.

The starting up energy of train EPL2T

V , km/h	V , m/s	w_0' , N/kN	W_0 , N	W , N	t_{st} , s	l_{st} , m	A_w , MJ	A_k , MJ	A_{st} , MJ	Capacity C , F	
										Case #1	Case #2
10	2,78	1,4667	8142,7	14471,6	3,71	5	0,074	2,36	3,04	0,517	0,414
20	5,56	1,7468	9697,7	16026,7	7,41	10	0,16	9,44	12	2,04	1,63
30	8,33	2,080	11549,2	17878,1	11,1	23	0,41	21,24	27,06	4,6	3,68
40	11,11	2,467	13697,2	20026,2	14,8	40	0,80	37,77	48,2	8,2	6,56
50	13,89	2,908	16141,6	22470,5	18,52	100	2,25	59,0	76,56	13,02	10,42
60	16,67	3,401	18824	25211,3	22,2	150	3,78	85,0	111,0	18,86	15,10
70	19,45	3,948	21919,8	28248,7	25,9	200	5,65	115,66	151,6	25,79	20,62
80	22,22	4,549	25253,6	31582,5	29,63	300	9,47	151,1	200,7	34,13	27,30

It is necessary to set the starting up speed from zero to 10...80 km/h. The formula calculation (10) starts from evaluation of the energy $A_w(V)$ which is consumed on overcoming the main forces of the train running resistance (2)-(9).

According to the experimental results [7], the main equation of the running resistivity in the range of $V = 30...130$ km/h is:

$$w_0' = 1,24 + 0,02 \cdot V + 0,000267 \cdot V^2.$$

To determine the additional running resistance W_{fr} by expressions (6) and (7) we obtain the resulting running resistance using expression (8). According to [4], the carriages of the fully loaded train have the next weights: carriages with cabs – 63,4 t, motor carriages – 78,6 t, intermediate carriages – 62,7 t. Therefore the weight of two carriages with cabs is $63,4 \cdot 2 = 126,8$ t, and values in formula (7) are $m_0 = 15,85$ t, $W_{fr}' = 1,225$ N/kN. The weight of four motor carriages is 314,4 t and coefficients are $m_0 = 19,65$ t, $W_{fr}' = 1,05$ N/kN. Finally, weight of two intermediate carriages is 125,4 t and coefficients are $m_0 = 15,675$ t, $W_{fr}' = 1,24$ N/kN.

So the mean square value of the specific additional running resistance W_{fr}' in formula (8) equals 1,14 N/kN.

Then the additional running resistance W_{fr} , according to (6), is equal to 6328,94 N.

In the process of determining A_{st} , the formula (10) uses the efficiency of TEM type 1DT.003.L8U1 which is equal to 0,915 [4]. The efficiency of pulse converter [8-10] and on-board supercapacitor storage system is 0,9 [9]. The results of calculations are given in Table 1. The calculations are made for two cases: the first is for

$U_c = 3960$ [V], $U_d = 1980$ [V]; the second is when $U_c = 3960$ [V], $U_d = 990$ [V]. In both cases,

the starting up time is defined as $t_{st} = \frac{V}{a}$, where

$a = 0,75$ m/s² is the train acceleration [7]. The distance passed by train in starting up period l_{st} is taken from [7] Fig. 5.4 with respect to time t_{st} .

From table 1, the train starting up from zero speed to 10...80 km/h requires the energy from 3,04 to 200,7 MJ. Practical estimation of the amount of energy was performed for EPL2T in the process of operation in the section Dnipropetrovsk-Piatykatky of Prydniprovsk railway. These results are presented in table 2 and show the speed ranges which can be obtained after stopping.

Table 2

The starting up energy of train EPL2T

Name of the stop/station, where the train starts recuperative braking	Stored energy, MJ	The possible final speed after starting up, km/h
165 km	50,27	40
160 km	50,67	40
Dniprodzerzhynsk	69,7	45
Voskobia	71,3	50
139 km	4,05	10
Verhniodniprovsk	38,9	35
128 km	68,62	45
125 km	69,1	45
119 km	59,52	48
114 km	42,2	35
Hranovo	94,2	55
104 km	105,1	60
Vilnohorsk	79,2	52
Zhelezniakovo	150,1	70
88 km	22,1	30
77 km	41,2	35

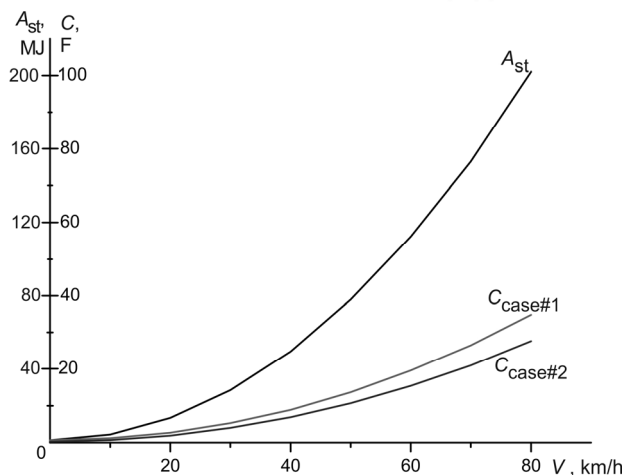


Fig. 1. Graphs of the starting up energy and storage system capacity with respect to the train speed EPL2T

REFERENCES

1. Kostin, Mykola *Avtonomnost rekuperativnogo tormozheniya – osnova nadezhnoy i energoeffektivnoy rekuperatsii na elek-tropodvizhnom sostave postoyannogo toka* [Recuperative braking autonomy is a basis of reliable and efficient energy recuperation in DC electric rolling stock] / Kostin Mykola, Nikitenko Anatolii // *Zaliznychnyi transport Ukrainy* [Railway Transport of Ukraine]. – 2014. – №3(106) – P. 15-23.
2. Nikitenko, Anatolii *Zbilshennia obiemu rekuperovanoi elektroenerhii na elektropoizdakh postiinoho strumu* [Raising of the recuperated electric energy amount in DC electric multiple-unit trains] / Anatolii Nikitenko, Mykola Kostin // *Zaliznychnyi transport Ukrainy* [Railway Transport of Ukraine]. – 2015. – №2(110).
3. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Rules of traction calculations for train operation]. – Moscow : Transport, 1985. – 287 p.
4. Getman, G. K. *Teoriya elektricheskoy tyagi: monografiya* [Electric Traction Theory: monograph] / G. K. Getman. – Dnipropetrovsk: Makovetskii Publishing, 2011. Volume 1. – 456 p.
5. Rozenfeld, V. E. *Teoriya elektricheskoy tyagi: monografiya* [Electric Traction Theory: monograph] / V. E. Rozenfeld, I. P. Isaev, N. N. Sidorov. – Moscow: Transport, 1983. – 328 p.
6. Astakhov, Y. N. *Funktsionalnye vozmozhnosti nakopiteley elektricheskoy energii v energosistemakh* [Functional Capabilities of Electric Energy Storage Elements in Power Systems] / Y. N. Astakhov, V. A. Venikov, A. M. Ivanov and others // *Electricity*. – 1983. – №4. – P. 1-6.
7. Basov, H. H. *Rozvytok elektrychnoho motorvonnogo rukhomoho skladu: chastyna 2* [Progress of Electric Multiple Unit Rolling Stock. Part 2] / H. H. Basov, S. I. Yatsko. – Kharkiv: "Apeks+", 2005. – 248 p.
8. Rozenfeld, V. E. *Elektropoezda postoyannogo toka s impulsnymi preobrazovatelyami* [DC Multiple Unit Trains with Pulse Converters] / Edited by V. E. Rozenfeld. – Moscow : "Transport", 1976. – 280 p.

© Kostin M. O., Nikitenko A. V., 2015

Conclusions

1. Theoretical analysis shows that the additional running resistance should be taken into consideration in the calculations of starting up and acceleration energy of ERS.
2. The values of energy starting up and capacity of on-board supercapacitor storage system increase parabolically with the increasing of the moving speed.
3. The proposed autonomous (off-line) recuperative braking can be fully obtained, but the final speed of the train is different and depends on the track conditions and the quantity of stored energy.
4. The using of stored energy allows to reduce the energy consumption in traction mode on 18...25%.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Костин, Н. А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной и энергоеффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н. А. Костин, А. В. Никитенко // *Залізничний транспорт України*. – 2014. – №3(106) – С. 15-23.
2. Нікітенко, А. В. Збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоїздах постійного струму / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // *Залізничний транспорт України*. – 2015. – №2(110).
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.
4. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги: монография / Г. К. Гетьман. – Дн-вск : Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1. – 456 с.
5. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М. : Транспорт, 1983. – 328 с.
6. Астахов, Ю. Н. Функциональные возможности накопителей электрической энергии в энергосистемах / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, А. М. Иванов и др. // *Электричество*. – 1983. – №4. – С. 1-6.
7. Басов, Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу: частина 2 / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків : "Апекс+", 2005. – 248 с.
8. Розенфельд, В. Е. Электropoezda postoyannogo toka c impulsnymi preobrazovatelyami / под. ред. В. Е. Розенфельда. – М. : "Транспорт", 1976. – 280 с.
9. Штанг, А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: дис. ... к-та техн. наук : 05.09.03 / Штанг Александр Александрович ; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». – Новосибирск, 2006. – 233 с.
10. Бирзниец, Л. В. Импульсные преобразователи постоянного тока / Л. В. Бирзниец. – М:

9. Shtang, A. A. *Povyshenie effektivnosti elektro-transportnykh sistem na osnove ispolzovaniya nakopiteley energii* [Improving the Efficiency of Electric Transport Systems Using the Energy Storage Elements] : dissertation of the candidate of technical sciences : 05.09.03 / Shtang Alexander A. ; Novosibirsk State Technical University. – Novosibirsk, 2006. – 233 p.

Энергия, 1974. – 256 с.

Received 26.05.2015.

10. Birznieks, L. V. *Impulsnye preobrazovateli postoyannogo toka* [DC pulse converter] / L. V. Birznieks. – M: Energiya, 1974. – 256 s.

In the last 20 ... 25 years the volume of recuperated electric energy is less than 2% of the consumed by traction, while it is possible to return about 10 ... 15%. The main reason is unsatisfactory and inefficient usage of recuperated and transmitted energy to the power supply system. The paper proposes to solve this problem and induce the efficiency and the degree of recuperated energy of DC multiple unit trains by the usage of on-board supercapacitive storage system. The methods of the electric traction theory and the theory of pulse electrical engineering are used for the problem solving. The developed methodology allows to calculate the energy, which is required to starting up the multiple unit train EPL2T to some speed 10 ... 80 km/h after its stopping. Furthermore, the capacity of the on-board storage is calculated in two cases of storing recuperated energy. The novelty of the paper is the new method for estimating energy, which is required to starting up (after the stopping) the train to a certain speed. The analytical expression of the capacity of the on-board storage system was achieved and calculated for the previously estimated energy. For the first time it was found that the energy, which was saved by the on-board supercapacitive storage system, is sufficient to start up the train to some speed and reach the characteristic of full field of the traction motors. The proposed autonomous mode of recuperative braking allows, at first, to increase significantly the efficiency of energy recovery, and secondly, to reduce the weight and size parameters of on-board storage supercapacitors.

Key words: energy; resistance movement; recovery; starting up; speed; train; supercapacitor; on-board storage system; the kinetic energy.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Shkrabets F. P.*

УДК 629.423 : 621.3.024 : 621.333.4

Н. А. КОСТИН, А. В. НИКИТЕНКО (ДНУЖТ)

Кафедра «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, к. 238, г. Днепропетровск, 49010, Украина, тел. +380563731537, e-mail: nkoston@ukr.net, nikitenko.diit@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-0856-6397, orcid.org/0000-0002-6426-5097

ЭНЕРГИЯ РАЗГОНА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

За последние 20...25 лет объем энергии рекуперации электропоездов не превышает 2% от использованной на тягу, в то же время как возможно возвращать до 10...15%. Одной из причин такого состояния есть неудовлетворительное неэффективное использование электроэнергии, которая рекуперруется и передается в тяговую сеть. В статье предлагается повысить энергетическую эффективность и степень использования электроэнергии рекуперации пригородных электропоездов постоянного тока с помощью бортового емкостного накопителя. Для решения поставленной задачи использованы методы теории электрической тяги и импульсной электротехники, а также методики Правил тяговых расчетов. Изложена методика и численные расчеты электроэнергии, необходимой для разгона электропоезда ЕПЛ2Т после остановки до скоростей 10...80 км/час. Более того, выполнено оценку емкости бортового накопителя для двух случаев накопления энергии рекуперации. Научная новизна статьи заключается в том, что предложен и использован новый метод оценки энергии, необходимой для разгона (после остановки) электропоезда до некоторой скорости. Получено аналитическое выражение емкости бортового накопителя электроэнергии, необходимой для пуска электропоезда после остановки. Установлено, что накопленной в бортовом накопителе энергии достаточно для разгона электропоезда до скорости выхода на характеристику полного возбуждения. Предложенный автономный фазовый режим рекуперативного торможения позволяет, во-первых, значительно повысить эффективность использования энергии рекуперации, во-вторых, снизить массогабаритные показатели бортового емкостного накопителя.

Ключевые слова: энергия, сопротивление движению, рекуперация, разгон, скорость, электропоезд, суперконденсатор, бортовой накопитель, кинетическая энергия.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Шкрабец Ф. П.*

© Kostin M. O., Nikitenko A. V., 2015

УДК 629.423 : 621.3.024 : 621.333.4

М. О. КОСТИН, А. В. НІКІТЕНКО (ДНУЗТ)

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, к. 238, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна, тел. +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, nikitenko.dii@gmail.com,
ORCID: orcid.org/0000-0002-0856-6397, orcid.org/0000-0002-6426-5097

ЕНЕРГІЯ РОЗГОНУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В останні 20...25 років об'єм енергії рекуперації електропоїздів не перевищує 2% від затраченої на тягу, в той час як можливо повертати до 10...15%. Однією із причин такого стану є незадовільне неефективне використання електроенергії, що рекуперується і передається в тягову мережу. В статті пропонується підвищити енергетичну ефективність і ступінь використання електроенергії рекуперації приміських електропоїздів постійного струму за допомогою бортового ємнісного накопичувача. Для розв'язання поставленої задачі використано методи теорії електричної тяги та імпульсної електротехніки, а також методики Правил тягових розрахунків. Викладено методику і чисельні розрахунки електроенергії, потрібної для розгону електропоїзда ЕПЛ2Т після зупинки до швидкостей 10...80 км/год. Більш того, виконано оцінку ємності бортового накопичувача для двох випадків накопичення енергії рекуперації. Наукова новизна статті полягає в тому, що запропоновано новий метод оцінки енергії, потрібної для розгону (після зупинки) електропоїзда до певної швидкості. Одержано аналітичний вираз ємності бортового накопичувача електроенергії, необхідної для пуску електропоїзда після зупинки. Встановлено, що заощадженої в бортовому накопичувачі енергії достатньо для розгону електропоїзда до швидкості виходу на характеристику повного збудження. Запропонований автономний фазовий режим рекуперативного гальмування дозволяє, по-перше, суттєво підвищити ефективність використання енергії рекуперації, по-друге, знизити масогабаритні показники бортового ємнісного накопичувача.

Ключові слова: енергія, опір руху, рекуперація, розгін, швидкість, електропоїзд, суперконденсатор, бортовий накопичувач, кінетична енергія.

Внутрішній рецензент *Kuznetsov V. G.*

Зовнішній рецензент *Шкрабець Ф. П.*

П. А. ЛОЗА, Т. С. ГРИШЕЧКИНА (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010 Днепропетровск, Украина, ORCID: orcid.org/0000-0002-6698-5639

Кафедра «Высшая математика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010 Днепропетровск, Украина, тел.: +38(0562)362604, эл. почта: gitann@rambler.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-1570-4150

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ СИСТЕМЫ СОДЕРЖАНИЯ ПАРКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Введение

Железные дороги осуществляют содержание электроподвижного состава (ЭПС) на основании рекомендаций производителя, системы планово-предупредительных ремонтов и технического обслуживания, проводимых с определенной периодичностью в зависимости от пробегов или времени работы, а также на основании диагностики состояния ЭПС.

Главной задачей системы содержания любого транспортного средства является постоянный контроль и поддержание его технического состояния и надежности на уровне, достаточном для выполнения им заданных функций.

Основными параметрами системы содержания локомотивного парка дороги являются межремонтные пробеги, количества и виды (объемы) плановых ремонтов.

Множество исследований посвящены оптимизации данных параметров. В качестве критериев оптимальности предлагаются:

- показатели интенсивности износа деталей ТПС [1,2];
- показатели надежности (вероятность безотказной работы, коэффициент технического использования и др.) [3,4];
- показатели эффективности использования локомотивов (расходы на плановые и неплановые ремонты, расходы на устранение отказов) [4,5].

Также, в работах [6-11], направленных на совершенствование системы содержания ЭПС, предлагается количественная оценка влияния плановых восстановлений на работоспособность подвижного состава с учетом условий эксплуатации, технологии и специализации ремонтной базы.

Однако, рассматривая ту или иную систему содержания, необходимо в первую очередь оценивать качество ее выполнения. Такая оценка затрудняется необходимостью одновременно

принимать во внимание множество значений взаимосвязанных между собой показателей.

Цель

Целью данной работы является разработка методов количественной оценки качественных изменений в системе содержания парка ЭПС дороги.

Основная задача исследования – создание единого показателя, объединяющего в себе данные о параметрах конкретной системы содержания парка ЭПС дороги и характеризующего состояние данной системы.

Для проверки адекватности данного обобщенного показателя (назовем его индексом) будем использовать t -критерий Стьюдента, а также рассмотрим взаимосвязь построенного индекса со средним процентом выполнения плана ремонтов парка электроподвижного состава.

Методика

При изучении состояния системы содержания парка электроподвижного состава дороги были взяты значения следующих показателей с 2006 по 2013 год:

- количества плановых депоовских ремонтов электровазов – ТО3, ТР1, ТР2, ТР3;
- простои на плановых ремонтах;
- количества и простои на неплановых ремонтах;
- грузооборот, брутто;
- процент неисправных электровазов.

Задача построения единого обобщенного показателя была реализована в два этапа.

На первом этапе использовался метод главных компонент [12]. Данный метод позволяет исходные переменные путем линейных преобразований привести к новым, нормированным и некоррелируемым между собой переменным. Причем, их количество уже существенно меньше исходных. В результате удалось сократить количество рассматриваемых факторов с 12 до 4 с сохранением 87 % значимой исходной информации.

© Лоза П. А., Гришечкина Т. С., 2015

Далее, на втором этапе применялся метод анализа иерархий [13]. С помощью него на основании полученных главных компонент был построен индекс выполнения системы содержания. Данный индекс имеет вид

$$I_{vss} = \sum_{i=1}^n w_i z_i,$$

где z_i , $i = \overline{1, n}$ – главные компоненты, полученные на первом этапе анализа;

w_i , $i = \overline{1, n}$ – весовые коэффициенты, определяемые как компоненты собственного вектора матрицы попарных сравнений [1].

Значения индекса для системы содержания парка ЭПС Приднепровской железной дороги по годам и графически приведены в табл.1 и на рис. 1.

Таблица 1

Значения индекса с 2006 по 2013 г.

Год	Индекс
2006	0,545
2007	0,474
2008	0,256
2009	0,401
2010	0,486
2011	0,515
2012	0,474
2013	0,578

Далее, на основании ежегодных данных о линейном пробеге и количества проведенных ремонтов (табл.2) определим фактическое выполнение системы содержания локомотивного парка дороги.

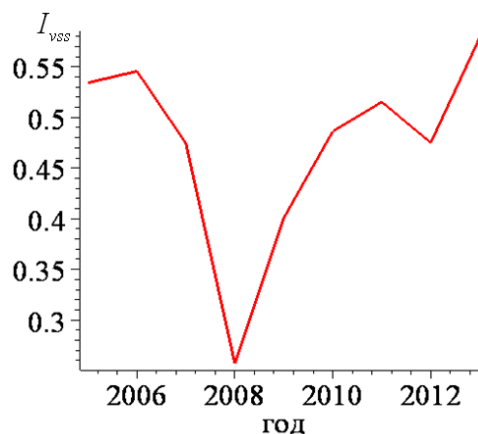


Рис. 1. Индекс выполнения системы содержания локомотивного парка

Плановая программа депоовских ремонтов рассчитывается по следующим формулам:

$$M_{TR3} = \frac{\sum MS}{L_{TR3}}; M_{TR2} = \frac{\sum MS}{L_{TR2}} - M_{TR3};$$

$$M_{TR1} = \frac{\sum MS}{L_{TR1}} - M_{TR2}; M_{TO3} = \frac{\sum MS}{L_{TO3}} - M_{TR1},$$

где $M_{TR3}, M_{TR2}, M_{TR1}, M_{TO3}$ – количества соответствующих видов ремонтов;

$\sum MS$ – годовой линейный пробег локомотивов;

$L_{TR3}, L_{TR2}, L_{TR1}, L_{TO3}$ – нормы межремонтных пробегов для соответствующего вида ремонта.

Результаты расчетов показаны в табл. 3

Выполнение плана по ремонтам показано в табл. 4–7 и на рис.2–5.

Таблица 2

Фактическое выполнение плана по ремонтам локомотивов

Год	ТОЗ	ТР1	ТР2	ТР3	Неплановые ремонты	Неплановые ремонты на 1 млн. км	Пробег, млн. км	Пробег, км
2006	1700	1858	125	50	705	13,86	50,87	50 865 801
2007	1740	1898	108	53	679	12,9	52,64	52 635 659
2008	1637	1748	93	70	767	14,44	53,12	53 116 343
2009	1494	1639	138	59	676	14,72	45,92	45 923 913
2010	1521	1697	140	55	836	17,6	47,50	47 500 000
2011	1544	1782	121	78	1156	23,25	49,72	49 720 430
2012	1410	1670	111	62	3013	62,18	48,46	48 456 095
2013	1306	1569	131	63	2796	60,69	46,07	46 070 193

Таблица 3

Нормативные количества ремонтов

Год	Виды ремонтов			
	ТО3	ТР1	ТР2	ТР3
2006	1 841	1 550	145	145
2007	1 905	1 604	150	150
2008	1 922	1 619	152	152
2009	1 662	1 400	131	131
2010	1 719	1 448	136	136
2011	1 799	1 515	142	142
2012	1 754	1 477	138	138
2013	1 667	1 404	132	132

Таблица 4

Выполнение ТО3, в % от плана

Год	ТО3 план	ТО3 факт	ТО3 выполнение, %
2006	1 841	1700	0,92
2007	1 905	1740	0,91
2008	1 922	1637	0,85
2009	1 662	1494	0,90
2010	1 719	1521	0,88
2011	1 799	1544	0,86
2012	1 754	1410	0,80
2013	1 667	1306	0,78

Таблица 5

Выполнение ТР1, в % от плана

Год	ТР1 план	ТР1 факт	ТР1 выполнение, %
2006	1 550	1858	1,20
2007	1 604	1898	1,18
2008	1 619	1748	1,08
2009	1 400	1639	1,17
2010	1 448	1697	1,17
2011	1 515	1782	1,18
2012	1 477	1670	1,13
2013	1 404	1569	1,12

Таблица 6

Выполнение ТР2, в % от плана

Год	ТР2 план	ТР2 факт	ТР2 выполнение, %
2006	145	125	0,86
2007	150	108	0,72
2008	152	93	0,61
2009	131	138	1,05
2010	136	140	1,03
2011	142	121	0,85
2012	138	111	0,80
2013	132	131	1,00

Таблица 7

Выполнение ТР3, в % от плана

Год	ТР3 план	ТР3 факт	ТР3 выполнение, %
2006	145	50	0,34
2007	150	53	0,35
2008	152	70	0,46
2009	131	59	0,45
2010	136	55	0,41
2011	142	78	0,55
2012	138	62	0,45
2013	132	63	0,48

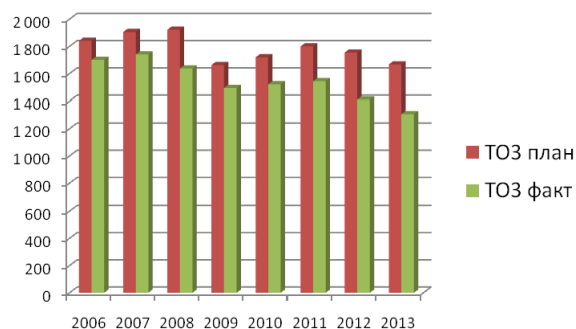


Рис. 2. Выполнение ТО3

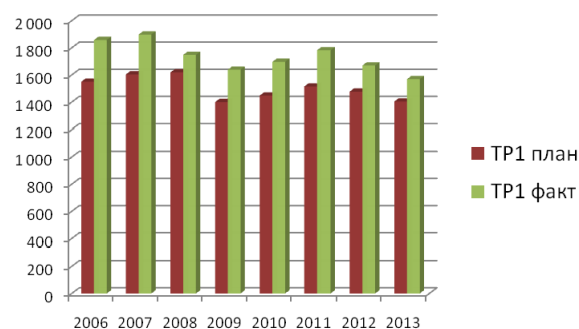


Рис. 3. Выполнение ТР1

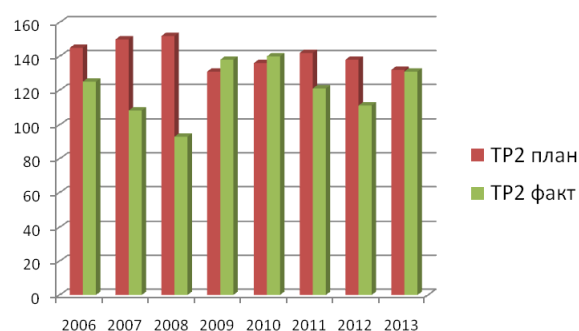


Рис. 4. Выполнение ТР2

Обобщив полученные результаты, получим средний процент выполнения плановых ремонтов.

Проведем сравнение фактического выполнения плана ремонтов и построенного на основании метода главных компонент и метода ана-

лиза иерархий индекса выполнения системы содержания (табл.8 и рис.6).

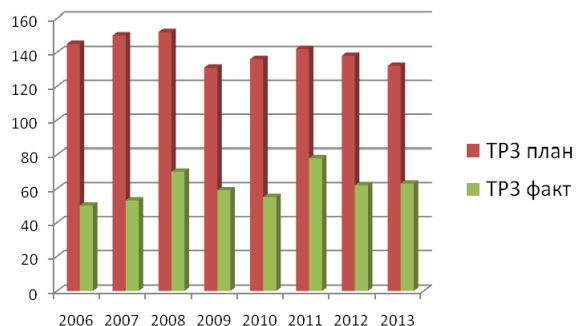


Рис. 5. Выполнение ТРЗ

Таблица 8

Средний процент выполнения плана ремонтов и индекс

Год	Средний процент выполнения плана ремонтов (P_s)	Индекс (I_{vss})
2006	0,831	0,545
2007	0,791	0,474
2008	0,751	0,256
2009	0,892	0,401
2010	0,873	0,486
2011	0,858	0,515
2012	0,796	0,475
2013	0,843	0,578

Далее, для проверки гипотезы равенства математических ожиданий этих случайных величин рассчитаем t -критерий Стьюдента (7 степеней свободы, вероятность ошибки $p = 0.001$) – $t = 11.66$. При этом граничное значение t -критерия составляет 5.41, что говорит о принадлежности эмпирического значения зоне значимых результатов.

Для более детального изучения взаимосвязи данных показателей рассмотрим индекс (I_{vss}) как функцию от среднего процента (P_s) выполнения плана ремонта (рис.7).

Аппроксимировав данные полиномом, получим следующую зависимость индекса как функции от среднего процента выполнения плана ремонта:

$$I_{vss} = -29.8 + 72.9x - 43.7x^2.$$

Выводы

Построен индекс выполнения системы содержания электроподвижного парка дороги – единый показатель, позволяющий количественно оценить ее качество.

Определена функциональная зависимость индекса от среднего процента выполнения плана ремонтов.

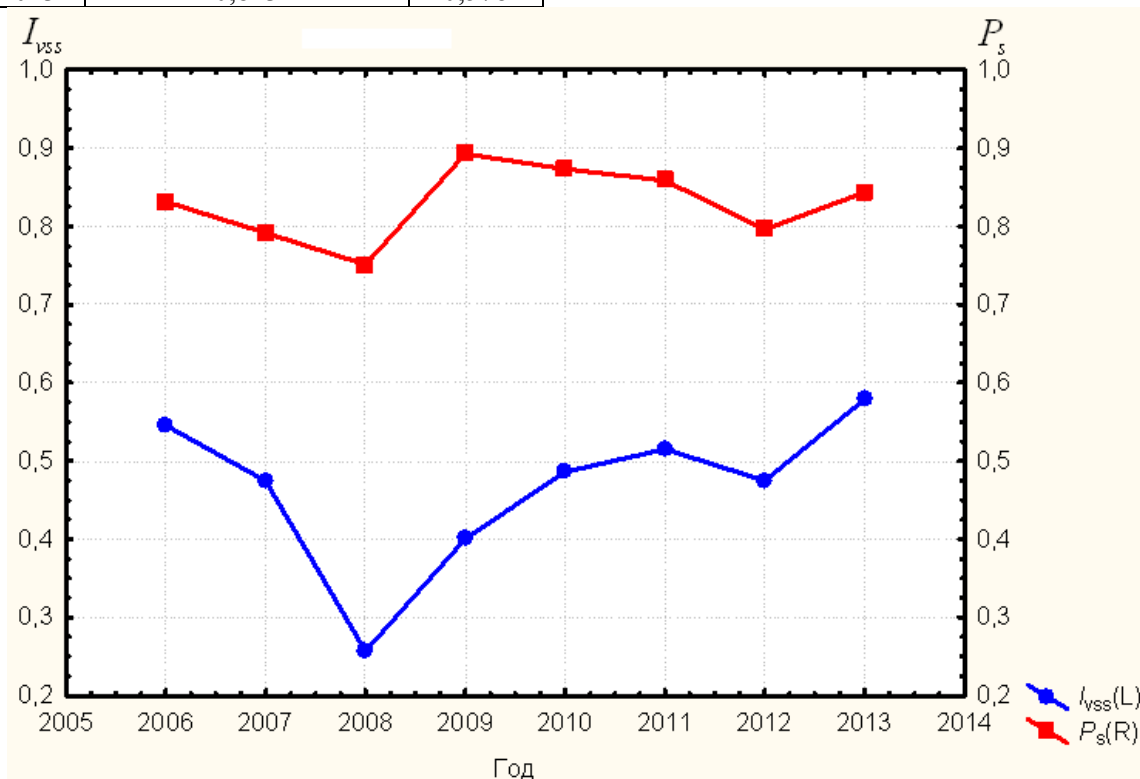


Рис. 6. Динамика изменения среднего процента выполнения плана ремонтов (P_s) и индекса (I_{vss})

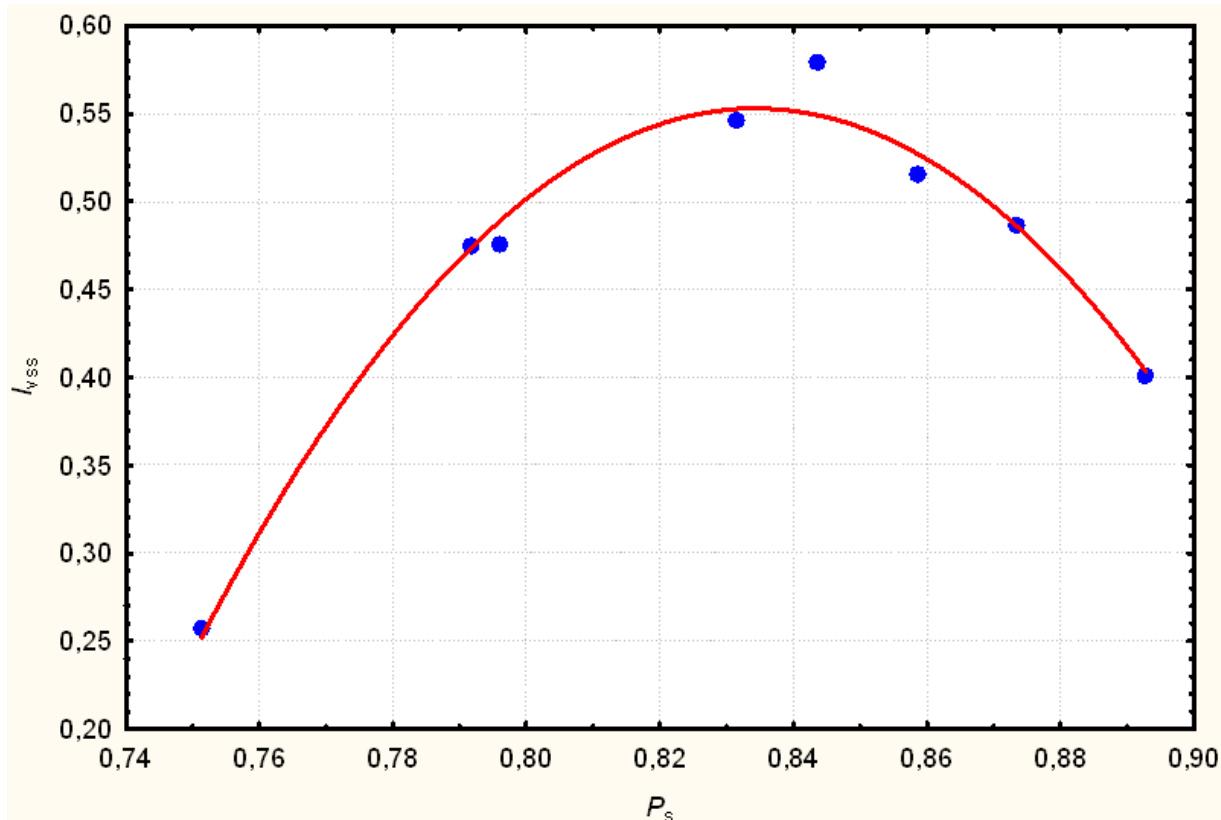


Рис. 7. Взаимосвязь индекса и среднего процента выполнения плана ремонтов

Предложен новый подход к оцениванию параметров системы содержания парка ЭПС. Получено количественное выражение качественных изменений системы технического обслуживания и ремонта.

Использование индекса выполнения системы содержания позволит определять качество проведения технического обслуживания и ремонта электроподвижного состава, а также принимать оперативные решения по регулированию

и корректированию системы содержания парка ЭПС дороги.

А также, использование полученного индекса позволит проводить оценку качественных изменений в системе содержания всего локомотивного парка дороги.

Данный показатель может быть полезен при проведении анализа работы ремонтной службы, а также работы парка ЭПС дороги.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградов Ю. Н. Выбор показателей использования электровозов для дифференцирования норм пробегов между их ремонтами / Ю. Н. Виноградов // Вестник ВНИИЖТ. – 1975. – № 7. – С. 6–9.
2. Виноградов Ю. Н. Совершенствование периодичности ремонтов грузовых электровозов / Ю. Н. Виноградов, В. М. Левитский // Тр. ВНИИЖТа. – М., 1983. – Вып. 671. – С. 3–16.
3. Черняков А. А. Повышение эффективности функционирования тепловозов железных дорог: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. А. Черняков. – Л., 1988. – 50 с.
4. Капранов Н. Н. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта грузовых электровозов в полигоне их обращения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. Н. Капранов. – М., 1987. – 21 с.
5. Исаев И. П. Разработка оптимальной системы ремонта / И. П. Исаев, С. Н. Журавлев, В. И. Седов //

REFERENCES

1. Vinogradov Yu. V. Vybora pokazateley ispolzovaniya elektrovozov dlya differentsirovaniya norm probegov mezhdu ikh remontami [Selection of indicators for the use of electric locomotives differentiation of norms runs between their repairs]. Vestnik VNIIZHTA - Vestnik of the Railway Research Institute, 1975, № 7, pp. 6-9.
2. Vinogradov Yu. V. Sovershenstvovanie periodichnosti remontov gruzovykh elektrovozov [Improving the frequency of repairs freight locomotives]. Tr. VNIIZHTA, 1983, issue 671, pp.3-16.
3. Chernyakov A. A. Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya teplovozov zhelezných dorog [Improving the efficiency of railways locomotives]: avtoref. dis. Dr.Sci.Tech, Lvov, 1988, p.50.
4. Kapranov N. N. Sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovykh elektrovozov v poligone ikh obrashcheniya [Improving the system of maintenance and repair of electric freight locomotives in the polygon of circulation]: avtoref. dis Candidate of

Железнодорожный транспорт. – 1970. – № 10. – С. 40–44.

6. Босов А. А. Теоретические основы и методика расчета плановых восстановлений локомотивов и вагонов: дис. ... д-ра техн. наук / А. А. Босов. – Л., 1986. – 283 с.

7. Босов А. А. Определение рациональной системы содержания технических объектов при кусочно-линейной аппроксимации Н-характеристики / А. А. Босов, Г. И. Семенец; Днепропетр. ин-т инженеров трансп. – Д., 1979. – 17 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС. № 1410.

8. Босов А. А. Определение оптимальных периодов диагностирования узлов тепловозов / А. А. Босов, Б. Е. Боднар; Днепропетр. ин-т инженеров трансп. – Д., 1986. – 7 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 01.12.86. № 3792-ж. д.

9. Босов А. А. Теоретические основы расчета рациональной системы планового восстановления технических объектов железнодорожного транспорта / А. А. Босов; Днепропетр. ин-т инженеров трансп. – Д., 1983. – 255 с. – № ГР 01830062337.

10. Босов А. А. Прогнозирование износа бандажей колесных пар и определение рациональной периодичности их обточки / А. А. Босов, А. А. Дроздов, Д. А. Курасов // Тр. Днепропетр. ин-та инженеров трансп. – Д., 1972. – Вып. 134. – С. 137–146.

11. Босов А. А. Рациональное восстановление электроаппаратов агрегата ПЭ-2М / А. А. Босов, В. В. Соловьев // Промышленный транспорт. – 1977. – № 6. – С. 18 – 23.

12. Лоули Д. Факторный анализ как статистический метод / Д. Лоули, А. Максвелл. – М.: Мир, 1967. – 144 с.

13. Ногин В. Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев / В. Д. Ногин. – С.-Петербург, 2004. – 17 с.

Поступила в печать 20.05.2015.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Сокол Е. И.*

Целью статьи является разработка методов количественной оценки качественных изменений в системе содержания парка электроподвижного состава дороги. Для количественной оценки качественных изменений в системе технического обслуживания и ремонта электроподвижного состава дороги предлагается использовать индекс выполнения системы содержания. Данный показатель строится на основании статистической информации о фактическом выполнении программы ремонтов для локомотивного парка дороги. На первом этапе с помощью метода главных компонент производится редукция исходных данных. На втором этапе полученные главные компоненты объединяются методом анализа иерархий в единый обобщенный показатель – индекс выполнения системы содержания. В результате работы построен индекс выполнения системы содержания локомотивного парка дороги. Показана взаимосвязь данного индекса и среднего процента выполнения плана ремонта. Предложен новый подход к оцениванию параметров системы содержания парка электроподвижного состава. Получено количественное выражение качественных изменений системы технического обслуживания и ремонта. Использование индекса выполнения системы содержания позволит определять качество проведения технического обслуживания и ремонта электроподвижного состава, а также принимать оперативные решения по регулированию и корректированию системы содержания локомотивного парка дороги.

Ключевые слова: система содержания локомотивного парка; метод главных компонент; метод анализа иерархий.

УДК 629.4.083 : 519.23

П. О. ЛОЗА, Т. С. ГРИШЕЧКИНА (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010 Дніпропетровськ, Україна,
ORCID: orcid.org/0000-0002-6698-5639

Кафедра «Вища математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010 Дніпропетровськ, Україна, тел. +38(0562)362604, ел.пошта: gitann@rambler.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-1570-4150

ОЦІНКА ЯКОСТІ ВИКОНАННЯ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКУ

Метою статті є розробка методів кількісної оцінки якісних змін у системі утримання парку електрорухомого складу залізниць. Для кількісної оцінки якісних змін у системі технічного обслуговування і ремонту електрорухомого складу залізниць пропонується використовувати індекс виконання системи утримання. Даний показник будується на підставі статистичної інформації про фактичне виконання програми ремонтів для локомотивного парку залізниць. На першому етапі за допомогою методу головних компонент проводиться редукція вихідних даних. На другому етапі отримані головні компоненти об'єднуються методом аналізу ієрархій в єдиний узагальнений показник – індекс виконання системи утримання. У результаті роботи побудовано індекс виконання системи утримання парку електрорухомого складу залізниць. Показано взаємозв'язок даного індексу і середнього відсотка виконання плану ремонту локомотивів. Запропоновано новий підхід до оцінювання параметрів системи утримання парку електрорухомого складу. Отримано кількісне вираження якісних змін системи технічного обслуговування і ремонту. Використання індексу виконання системи утримання дозволить визначати якість проведення технічного обслуговування та ремонту електрорухомого складу, а також приймати оперативні рішення щодо регулювання та коригування системи утримання локомотивного парку залізниць.

Ключові слова: система утримання локомотивного парку; метод головних компонент; метод аналізу ієрархій.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*Зовнішній рецензент *Сокол Є. І.*

UDC 629.4.083 : 519.23

P. A. LOZA, T. S. GRISHECHKINA (DNURT)

Department of electric rolling stock of railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine,
ORCID: orcid.org/0000-0002-6698-5639

Department of higher mathematics, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel.: +38(0562)362604, e-mail: gitann@rambler.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-1570-4150

ESTIMATION OF THE QUALITY OF IMPLEMENTATION ELECTRIC ROLLING STOCK MAINTENANCE SYSTEM

The aim of the article is to develop methods for quantify the qualitative changes in the electric rolling stock maintenance system. To quantify the qualitative changes in the system of maintenance and repair of an electric rolling stock is proposed to use the index of the maintenance system implementation. This indicator is constructed on the basis of statistical information on the actual implementation of the repairs locomotives program. In the first step using principal component analysis held original data reduction. At the second stage, the principal components combined by the hierarchy analysis method into a single generalized index – the index of the maintenance system implementation. A result of work the index of the locomotives maintenance system implementation is built. The interrelation of the index and the average percentage of the plan repairs is shown. A new approach to the estimation of the locomotives maintenance system parameters is proposed. A quantitative expression of qualitative changes in the system of maintenance and repair is obtained. Using the index of the maintenance system implementation possible to determine the quality of maintenance and repair of an electric rolling stock, as well as to make operational decisions for regulation and the correction of locomotives maintenance system.

Keywords: electric rolling stock; repair system; mathematical modeling; principal component analysis; hierarchy analysis.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*External reviewer *Sokol E. I.*

© Лоза П. А., Гришечкина Т. С., 2015

О. М. СІНЧУК, Е. С. ГУЗОВ, І. О. СІНЧУК (ДВНЗ «КНУ»), В. О. ЧОРНА (КрНУ)

ДВНЗ «Криворізький національний університет», кафедра Автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, Україна, м. Кривий Ріг, вул. XXII Партз'їзду, 11, тел.: (056) 409-17-30, ел. пошта: speet@ukr.net

Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, кафедра Систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Україна, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20, тел.: (067) 8575375, ел. пошта: chornajav@gmail.com

ДО ПИТАННЯ КОМПЛЕКСНОСТІ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ШАХТНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Вступ

Залізородна сировина (ЗРС), що видобувається на вітчизняних гірничорудних підприємствах, надаючи до 70 % від щорічних надходжень, є вагомою складовою поповнення валютних запасів України [1].

Між тим, на жаль, собівартість видобутку ЗРС щорічно зростає, що ставить під загрозу конкурентоспроможність цього стратегічного для вітчизняної економіки продукту експорту [2].

Основною складовою вищезгаданого одіозного процесу є зростання енергозатрат, які складають більш третини в загальній собівартості ЗРС, по всіх циклах технології його видобутку та доставки, незалежно від способу видобутку: відкритий (кар'єрний) чи підземний (шахтний) [2].

При цьому, на відміну від кар'єрних способів видобутку корисних копалин шахтний характеризується тим, що електроенергетичні витрати в них складають близько 90 %, в тому числі до 16 % - це енерговитрати на внутрішньошахтний транспорт (ВШТ), парк котрого налічує близько чотирьох тисяч електровозів з застарілим енергонеефективним обладнанням.

Між тим другим, не менш вагомим негативним фактом у процесі експлуатації ВШТ залишається зростання матеріальних витрат гірничих підприємств на ремонт електрорухомого складу [2]. Як впливає з аналізу пошкоджень елементів нині експлуатованих тягових електромеханічних комплексів (ТЕМК) рудникових контактних видів електровозів (рис. 1 та рис. 2), динаміка їх ушкоджень з роками змінюється.

Але головне при цьому те, що матеріальні витрати на ремонт їх складових – тягових електричних двигунів (ТЕД) за останнє десятиліття по шахтам м. Кривого Рогу (так, очевидно, і іншим аналогічним підприємствам) збільшилися майже в 4 рази і становлять понад 90 % від усіх витрат на ремонт тягового електричного обладнання [2].

© Сінчук О. М. та ін., 2015

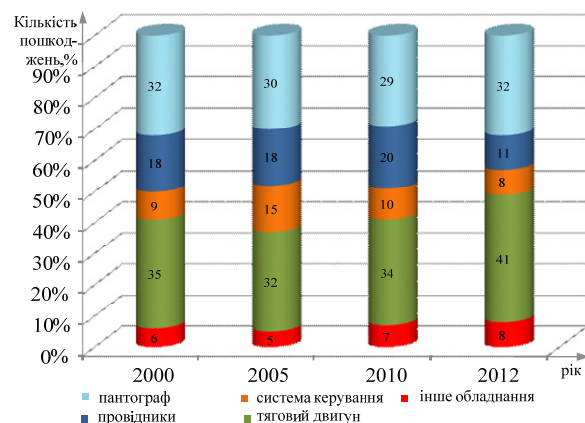


Рис. 1. Динаміка зміни по роках укрупнених показників кількостей пошкоджень основних елементів тягового електроукомплектування рудникових електровозів К14 при експлуатації їх в залізороудних шахтах Криворізького залізороудного басейну

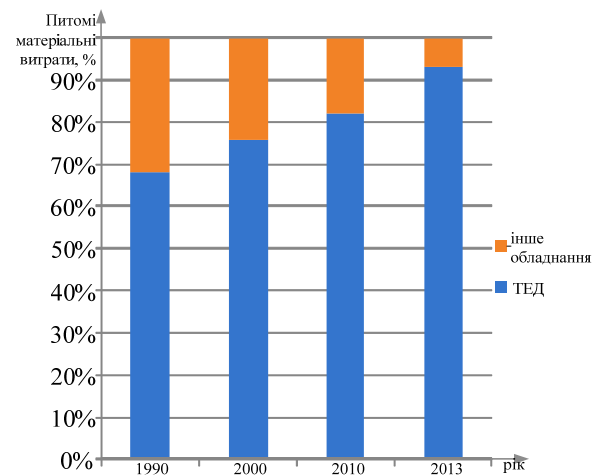


Рис. 2. Динаміка зміни питомих матеріальних витрат на ремонт тягового електроукомплектування рудникових електровозів по шахтах Криворізького залізороудного басейну

Така ситуація диктує вимоги до необхідності додаткового аналізу цього процесу та розробки обґрунтованих і одночасно реальних та су-

часних пропозицій щодо виходу зі сформульованого положення [3; 4].

Актуальність досліджень

Приведення вищезгаданих факторів неефективності функціонування ТЕМК до бажано оптимальних значень з підвищенням його експлуатаційної надійності, як і електропотягів в цілому, можливі лише за умови побудови й застосування сучасних систем управління з можливостями поточного контролю за станом електричних та технологічних параметрів тягового обладнання. При цьому необхідно розуміти, що тягові електромеханічні комплекси електровозів, як основа структури електрообладнання взагалі, та їх рудникових (шахтних) видів зокрема, являють собою складні багатофункціональні системи, в котрих є значна кількість параметрів, які необхідно контролювати [3–10].

Однак, виходячи з тих же результатів аналізу пошкоджень складових тягових електромеханічних комплексів шахтних електровозів і «тяжкості» наслідків цих моментів, все ж першим кроком у побудові системи контролю параметрів елементів тягових комплексів повинно бути питання контролю тих параметрів, що найбільш ймовірно призводять до пошкодження складових тягових електромеханічних комплексів в т.ч. ТЕД, а, отже, непрацездатності електровоза в цілому [6; 9 – 11].

В роботах [5; 8] запропоновано контролювати температурні режими функціонування ТЕД. Для цього приведено авторські схемотехнічні рішення.

В свою чергу, в [9] приведено новий безсенсорний спосіб контролю швидкості руху потягу в підземних умовах з метою не допустити перевищення регламентованого значення. Між тим, бажана ефективність наведених вище засобів для умов шахтних електровозів буде достатньо ефективною лише в разі їх комплексного застосування.

Розглянемо кожний із засобів окремо. При цьому будемо дотримуватись тактики побудови способів в тому, щоб визначати необхідні параметри на основі вже контролюємих в структурі ТЕМК [10 – 13].

У свою чергу, такими параметрами є значення струму, напруги і викликаний ними процес нагріву елементів ТЕД. Як доведено в [5; 9 – 10], саме виходячи з контролю значень перших двох вищенаведених складових можна контролювати третій – температуру ТЕД в процесі функціонування електровоза в циклах рейсу [11].

Така черговість підходу до тактики будови системи контролю базується на результатах аналізу причин пошкоджень ТЕД під час робо-

ти електровозу. А це, насамперед, вплив температури перегріву [10] на складові ТЕД, точніше на його якорну обмотку (рис. 3).

Як свідчить рис. 3, температура ТЕД з часом роботи електровоза постійно збільшується, що в умовах безконтрольності, безумовно, призведе до перегріву обмоток з подальшим їх руйнуванням.

Другим, не менш важливим параметром для контролю є швидкість електровозу, котра регламентується відповідними «Правилами безпеки» [10], і перевищення котрої веде до серйозних технологічних аварій та загрози життю гірників.

Між тим для шахтних електровозів, зі специфікою їх функціонування в умовах підземних гірничих виробок, вектор вирішення вищевикладених проблем з їх комплексністю, в свою чергу, лежить в напрямку розбудови систем контролю на основі, перш за все, безсенсорних засобів [9; 10].

Постановка задачі

Обґрунтування та розробка схемотехнічних рішень ефективних та надійних в експлуатації засобів безсенсорного контролю теплових режимів тягових електричних двигунів постійного струму та швидкості руху шахтних електровозів.

Матеріали досліджень

Як свідчить досвід експлуатації наземних електрифікованих видів транспорту застосування лише системи безперервного температурного контролю режимів функціонування ТЕД дозволяє знизити відмови останніх на 30 ... 35 %, виходи з ладу колекторів в 2,6 ... 3,3 рази, кругових вогнів в них в 3,1 ... 3,7 рази при загальному зменшенні колекторів в 2,8 ... 3,4 рази [3]. В свою чергу, експлуатація ТЕД без систем контролю теплових режимів збільшує кількість їх відмов в 1,5 ... 3,5 рази [3].

Реально можливими способами контролю температури ТЕД та побудови відповідних захистів є:

- закладка в двигун датчиків температури;
- застосування теплових реле;
- непряма оцінка, яка базується на вимірюванні опорів обмоток двигуна або розрахунках втрат у двигуні.

Найбільш точним, та нині найчастіше застосовуваним, є метод безпосередньої оцінки температури обмотки або активної сталі за допомогою датчиків температури [13]. Головними недоліками методу є:

- необхідність закладення датчиків в обмотки двигуна, що в умовах експлуатації без його демонтажу неможливо;

– необхідність виведення з двигуна додаткових провідників, що в умовах жорсткої вібрації може призвести до їх ушкодження та відмов системи захисту.

Другим сучасним напрямком можуть бути, та і є, теплові реле, які все ж, як свідчать дослідження, раціонально застосовувати при захисті ТЕД з постійним або мало змінним навантаженням [13]. При перевищенні струмів тривалого режиму теплові реле спрацьовують занадто швидко, що може спричинити «перегони автоматів».

Окрім цього такі реле непридатні для захисту ТЕД від перегріву, що найбільш характерно для двигунів функціонуючих в складі ТЕМК рудникових електровозів [10].

Між тим, як свідчать дослідження авторів [5; 9; 11], розрахунок втрат енергії в ТЕД за аналізований період часу дозволяє здійснити непряму, але достатньо точну оцінку процесу його нагрівання.

При застосуванні цього методу період роботи ТЕД розбивається на інтервали, протягом яких струм можна вважати сталим. В сучасних мікропроцесорних бортових системах управління електровозів можна реалізувати безпосередню оцінку втрат енергії шляхом визначення еквівалентного струму відповідно до виразу:

$$I_{\text{екв}} = \alpha \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt} . \quad (1)$$

де α – коефіцієнт, що враховує погіршення охолодження двигуна при знижених швидкостях, приймається в межах 1,15 – 1,4 [5].

Якщо значення перевищує номінальний струм тривалого режиму, спрацьовує захист,

подаючи сигнал на відключення тягового електропривода.

Середня температура обмотки ТЕД може бути визначена за величиною її опору. Метод базується на властивості реальної зміни опору обмоток ТЕД в функції зміни температури.

Температура обмотки визначається за виразом [10]:

$$t_{\Gamma} = \frac{R_{\Gamma} - R_{\chi}}{R_{\chi}} (k + \tau_{\chi}) + \tau_{\chi} , \quad (2)$$

де R_{Γ} , R_{χ} – опори обмоток, які виміряні, відповідно у гарячому та холодному стані; τ_{χ} – температура обмотки у холодному стані; k – коефіцієнт, що дорівнює 235 для мідної обмотки та 245 для обмотки з алюмінію.

Як свідчать дослідження [3; 7; 10], найбільш небезпечне та інтенсивне нагрівання відбувається у обмотці якоря ТЕД, але контроль її температури супроводжується певними труднощами, пов'язаними зі щітковими контактами, оскільки їх опір нестабільний та може змінюватися в десятки разів залежно від марки щіток, їх приробітки, стану поверхні колектора та його температури, частоті обертів і т.п. До того ж щітки перекривають декілька колекторних пластин, шунтуючи окремі секції обмотки якоря двигуна. Тому достатньо точно визначення температури якірної обмотки за її опором неможливе.

Однак існує інший шлях – контролювати температуру за опором обмотки збудження (ОЗ). Це можливо виходячи з наступних міркувань: обмотка збудження ТЕД включається послідовно з обмоткою якоря, тому по ним протікає однаковий струм; обмотки розташовані в одній машині, тому їх нагрівання та охолодження взаємопов'язані.

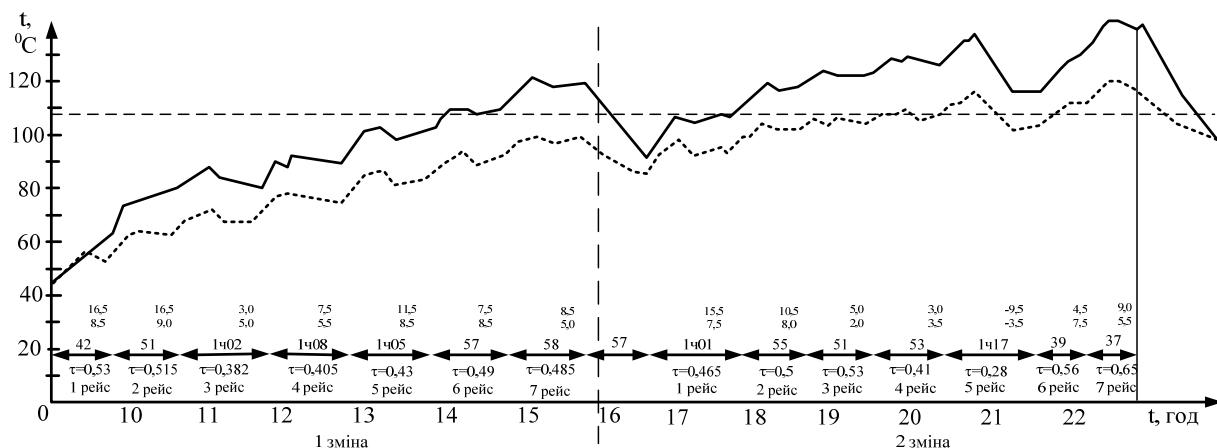


Рис. 3. Діаграма зміни температури обмотки якоря тягового двигуна ДТН-45/27 протягом двох змін роботи електровоза К14 (горизонт 1045 м ш. Батьківщина, ПАТ «Криворізький залізничний комбінат»)

Це дозволяє за температурою ОЗ точно визначити температуру якоря. Дослідження розподілу температур, проведені авторами на реальному лабораторному стенді, показали, що при максимально допустимій температурі обмотки якоря вона нагрівається на 25°C вище, ніж ОЗ. Враховано також, що допустима температура обмотки якоря ТЕД для ізоляції класу F складає 155°C , а максимально допустима за нагріванням – становить 130°C .

Отже логічним виглядає, що незважаючи на те, що ОЗ допускає й більш високу температуру, захист від перегрівання ТЕД повинен спрацьовувати при досягненні температури цієї обмотки 130°C . При цьому температура відповідає рівню опору [11]:

$$R_{130}^{Cu} = R_x \frac{365}{235 + \tau_x}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлено варіант реалізації схеми захисту ТЕД від перегрівання.

Середнє значення напруги U знімають з ОЗ через коло, що складається з $R1-R2$ та C , яке обмежує імпульси напруги при комутаціях в силовому колі пристрою, що захищається. Середнє значення струму I , який протікає через ОЗ, визначають за допомогою шунта RS . Настроювання захисту на визначений опір та відповідну температуру здійснюють резистором підстройки $R3$. Блок пристрою захисту містить аналоговий інтегральний дільник, який виконує функцію ділення $U_{\text{сеп}}/I_{\text{сеп}}$ – тобто безперервно визначає величину опору обмоток. При досягненні значення опору, який відповідає температурі ОЗ 130°C , захист спрацьовує, темпе-

ратура обмотки якоря при цьому сягає температури 155°C .

Схема не потребує встановлення в ТЕД датчиків температури, – безпосередньо ОЗ ТЕД є датчиком. Це робить захист ТЕД простим та надійним.

В даній структурі як реальний варіант дільника для практичної реалізації може слугувати мікросхема 4-Quadrant Multiplier/Divider AD734 © Analog Devices, Inc. Схема підтримує два режими аналогового ділення. Її рекомендовано використовувати як аналоговий дільник, який працює в режимі безпосереднього регулювання напруги. Цей режим є більш точним, гнучким та дозволяє підвищити частоту роботи мікросхеми.

Другим параметром, котрий повинен підлягати контролю є швидкість руху потягу. Як відомо, цей параметр жорстко регламентований Правилами безпеки у шахтах [11] диференційовано по ділянкам підземного технологічного маршруту руху електровозів. При цьому найважливішою умовою забезпечення безпеки є обмеження швидкості руху ЕРС за умовою допустимої довжини гальмівного шляху, який при перевезенні вантажів не повинен перевищувати 40 м, а при перевезенні персоналу 20 м. Гальмівний шлях ЕРС розраховують за умов найгіршого варіанту – рух з вантажем під ухил до стволу. Ця ділянка найбільш небезпечна, швидкість руху на ній обмежують до 10 км/год, хоча (за тяговими можливостями) потяг може розвивати значно більшу швидкість.

В різні часові періоди розвитку рудничних типів електровозів розроблялися та перебувають в експлуатації до теперішнього часу ціла «лінійка» пристроїв контролю швидкості локомотивосоставів в тому числі й рудникових [5, 14].

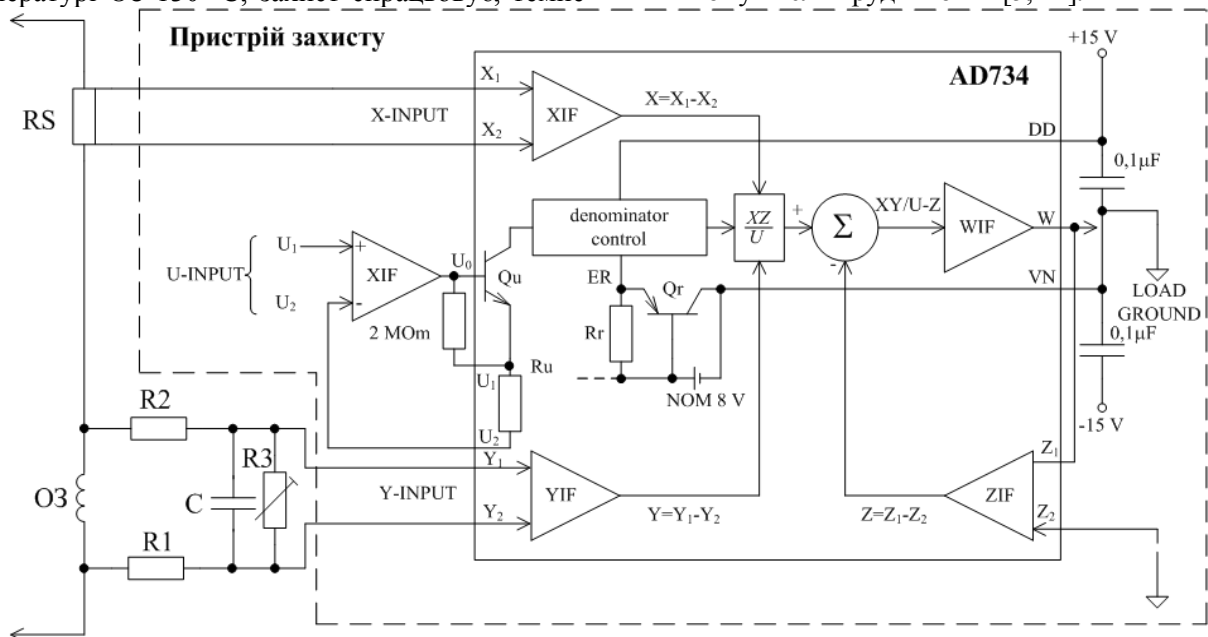


Рис. 4. Схема захисту тягового двигуна шахтного електровоза від перегрівання з використанням мікросхеми AD734
© Сінчук О. М. та ін., 2015

Так, в [5] приведено варіанти вимірювачів швидкості, встановлених на рудничних електровозах типу 10КР, 14КР виробництва Олександрівського машинобудівного заводу (Росія). Двоблокова система в першому блоці містить датчик–генератор з постійними магнітами, що генерує струм, величина якого пропорційна швидкості обертання ротора. Другий блок – магнітний тахометр, який відтворює ці струми та показує швидкість руху електровоза на пульті управління машиніста. Давач встановлюють на кришці редуктора тягової передачі електровоза та з'єднують з шестернею редуктора за допомогою власної шестерні. Як бачимо, навіть апріорно, очевидна складність такого пристрою.

За даними [14], в рудничних електровозах типу LG виробництва фірми ASEA (Швеція) для контролю швидкості руху електровозів використовують два варіанти. В першому датчики встановлюють на валу редуктора тягової передачі, в другому – вбудовують конструктивно в ТЕД. Обидва способи мають ті самі недоліки, як і в попередньому випадку.

Для контролю швидкості руху вітчизняного транспорту наразі застосовують ряд способів, в основу яких покладено контроль частоти обертання ТЕД або колісних пар з наступним перерахунком у швидкість руху потягу [5, 13].

Однак, якщо для умов електролокомотивів, які експлуатують в наземних умовах, зазначені варіанти систем контролю в тій чи іншій мірі прийнятні, то для умов їх підземного використання досягнення необхідної ефективності такими методами проблематичне [10].

На думку авторів, надійність вимірювача швидкості можна підвищити багатократно, застосувавши метод бездатчикового його контролю, використовуючи лише електричні параметри ТЕД. Відомо [14], що для ТЕД послідовного збудження значення струму й напруги однозначно визначають швидкість обертання. В загальному випадку частота обертання ТЕД дорівнює [14]:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}} - IR_{\text{я}}}{C_{\omega}\Phi}, \quad (4)$$

де $U_{\text{я}}$ – напруга на якорі; I – струм ТЕД; $R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря; Φ – магнітний потік; C_{ω} – конструктивний коефіцієнт.

В електричній тязі прийнято використовувати лінійну швидкість руху:

$$v = \frac{U_{\text{я}} - IR_{\text{я}}}{C_v\Phi}. \quad (5)$$

Як відомо [14], для ТЕД послідовного збудження магнітний потік є функцією струму $\Phi = f(I)$, тоді вираз (5) буде мати наступний вигляд:

$$v = \frac{U_{\text{я}} - IR_{\text{я}}}{C_v f(I)}. \quad (6)$$

Не зважаючи на складну залежність магнітного потоку від струму (у зв'язку з насиченням сталі) вона може бути виражена гіперболою з показником степені $x < 1$, тобто $\Phi \approx I^x$. Тоді вираз (6) матиме вигляд:

$$v = \frac{U_{\text{я}} - IR_{\text{я}}}{kI^x}. \quad (7)$$

Використовуючи реальну електромеханічну характеристику ТЕД та задаючи значення струму I можна визначити відповідні швидкості v та обчислити значення kI^x . Розрахунки показують, що для різних характеристик показник степені x знаходиться в межах 0,4 ... 0,6. Якщо визначено значення x , то значення коефіцієнту зв'язку k дорівнює:

$$k = \frac{U_{\text{я}} - IR_{\text{я}}}{vI^x}. \quad (8)$$

Структура запропонованого вимірювача швидкості наведена на рис. 5.

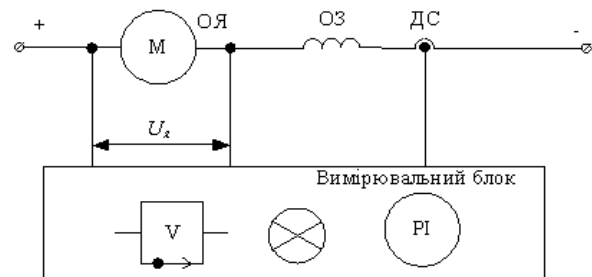


Рис. 5. Структурна схема вимірювача швидкості:

М, ОЗ – відповідно якор та обмотка збудження тягового електричного двигуна; ДС – датчик струму

Значення напруги якоря та струму двигунів подається на вхід вимірювального блоку, який обчислює поточну швидкість руху електровоза та видає її значення на табло або пристрій реєстрації. При перевищенні швидкості вище за допустиме значення запалюється сигнальна лампа. Крім того, на табло та пристрій пам'яті виводяться значення струму двигуна для інформування машиніста про поточне навантаження, як в дійсному часі, так і при необхідності відтворення в подальшому.

Висновки

Проведено аналіз та здійснено оцінювання якісних показників функціонування пристроїв контролю температурних режимів та вимірювачів швидкості, які застосовують в тягових електромеханічних системах з ТЕД постійного струму послідовного збудження сучасних руд-

ничних електровозів. Встановлено головні причини їх низької надійності та одночасно визначено напрям вдосконалення – бездатчикові способи контролю. За результатами проведених досліджень запропоновано функціональні та структурні схеми вимірювачів, що рекомендовані до практичної реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шидловский А. К. Геоэкономика та геополітика України [Текст] / А. К. Шидловский, Г. Г. Півняк., М. В. Рогоза, С. І. Випанасенко. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет. – 2007. – 282 с.
2. Бабец Е. К. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009–2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004–2011 гг. [Текст] / Е. К. Бабец, Л. А. Штанько, В. А. Салганик и др. – Кривой Рог: Видавничий дім. – 2011. – 329 с.
3. Носков В. И. Контроль и диагностика моторвагонных поездов с использованием нейронных сетей [Текст] / В. И. Носков, М. В. Липчанский, В. С. Блиндаж // Наук. техн. зб. «Комунальне господарство міст». – Харьков : ХНАМГ. – 2011. Вып. 101. – С. 278–283.
4. Yudong Li, Yujun Zhang and Tianyu Zhang., (2014), Simulation and Experimental Studies of Speed Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors for Mine Electric Locomotive Drive, *International Journal of Control and Automation*. Vol. 7, No. 1, pp. 55 – 68.
5. Синчук О. Н. Устройство для контроля и защиты от перегрева тяговых электродвигателей шахтных электровозов [Текст] / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, В. А. Федотов, В. О. Черная // Электротехнические и компьютерные системы – 2014. – № 15 (91).
6. Zagirnyak M., Romashykhina Zh., and Kalinov A., (2013), Improved Reliability of Diagnostics of Induction Motor Broken Rotor Bars, *Proceedings of the XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronics Engineering*, Ohrid, Macedonia, 2 – 14th September.
7. Шавкун В. М. Діагностування тягових електричних машин електротранспорту [Текст] / В. М. Шавкун // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков: – 2014. – Вып. 1/7(67). – С. 48 – 52.
8. Синчук О.Н. Вопросы повышения надежности системы мониторинга температурных режимов тяговых электрических двигателей рудничных электровозов [Текст] / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, Д. О. Кальмус, В. О. Черная // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Вып. 4/2014 (87). – С. 44 – 50.
9. Синчук О.Н. О бездатчиковом способе контроля скорости движения рудничных электровозов [Текст] / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый // Восточно-

REFERENCES

1. Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Rogoza M.V., Vipanaseko S.I. *Geoeconomika ta geopolitika Ukraini* [Geoeconomics and geopolitics of Ukraine], Dnepropetrovsk, *Natsionalniy girnichiyy universitet Publ.*, 2007, 282 p.
2. Babec E. K., Shtanko L. A., Salganik V. A. *Sbornik tehniko-ekonomicheskikh pokazateley gornodobyivayushchih predpriyatiy Ukrainyi v 2009–2010 gg. Analiz mirovoy konyunktury ryinka ZhRS 2004–2011 gg* [Compilation technical and economic parameters of mining enterprises of Ukraine in 2009- 2010 years. Analysis of the global IO market conditions 2004-2011]. Krivoy Rog, *Publishing House Publ.*, 2011, 329 p.
3. Noskov V. I., Lipchanskiy M. V., Blindag V. I. *Kontrol i diagnostika motor-vagonnykh poezdov s ispolzovaniem neyronnykh setey* [Monitoring and diagnostics motor-car trains using neural networks]. *Utilities city. KHAMG Publ*, Kharkov, 2011, vol. 101, pp 278–283.
4. Yudong Li, Yujun Zhang, Tianyu Zhang. Simulation and experimental studies of speed sensorless control of permanent magnet synchronous motors for mine electric locomotive drive, *International Journal of Control and Automation Publ.* 2014, Vol. 7, no. 1, pp. 55-68.
5. Sinchuk O. N., Guзов Je. S., Fedotov V. A., Chernaja V. O. *Ustrojstvo dlja kontrolja i zashhity ot peregreva tjagovykh elektrodvigatel'ej shahtnykh elektrovovozov* [Device for control and protection from overheating traction motors mine electric locomotives], *Elektrotehnicheskie i komp'juternye sistemy Publ.* Kyiv, (2014), vol. 15 (91), pp. 278–283.
6. Zagirnyak M., Romashykhina Zh., Kalinov A. Improved reliability of diagnostics of induction motor broken rotor bars, *Proceedings of the XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronics Engineering*, Ohrid, 2013, 2 – 14th September.
7. Shavkun V.M. *Diagnostuvannya tyagovykh elektrichnih mashin elektrotransportu* [Diagnosis of traction electric machines electric]. *Vostochno-Evropeiskii Zhurnal Peredovykh Tekhnologii Publ.* Kharkov, 2014, vol. 1/7(67), pp. 48 – 52.
8. Sinchuk O. N., Guзов Je. S., Sinchuk I. O., Kal'mus D. O., Chernaja V. O. *Voprosy povysheniya nadezhnosti sistemy monitoringa temperaturnykh rezhimov tjagovykh elektricheskikh dvigatelej rudnichnykh elektrovovozov* [The issues of reliability monitoring system temperature regimes traction electric motors mine electric locomotives]. *Visnik KrNU imeni Mihajla Ostrogradskogo Publ*, Kremenchug, 2014, vol. 4(87), pp. 44 – 50.

Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вып. 4/9 (70). – С. 59 – 63.

10. Черная В. О. К вопросу анализа повреждений тяговых двигателей шахтных электровозов [Текст] / В. О. Черная // Молодь: наука та інновації. Перша Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених. – Дніпропетровськ : ВНЗ «НГУ». – 2013. – С. 421 – 422.

11. НПАОП 10.0 – 1.01 – 05. Правила безпеки у вугільних шахтах. – Луганськ : Копіцентр. – 2005. – 196 с.

12. Bertil Oberg. Computer-controller ore Transformation at the LKAB mine in Kiruna, (1979). Sweden *Information of ASEA*. 212 p.

13. Бутт Ю. Ф. Шахтный подземный транспорт: справочное издание. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт [Текст] / Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый, А. Н. Коваль, А. Л. Фурман, В. М. Шука, В. А. Яценко : под общ. ред. Б. А. Грядущего. – Донецк : – 2009. – «ВИК», – Т.1. – 481 с.

14. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. И. Исаев, Н. К. Сидоров, М. С. Озеров. – М. : Транспорт – 1995. – 294 с.

Надійшла до друку 30.04.2015.

9. Sinchuk O. N., Guzov Je. S., Sinchuk I. O., Debelyj V. L., Debelyj L. L. *O bezdatchikovom sposobe kontrolja skorosti dvizhenija rudnichnyh jelektrovozovosostavov* [About the sensorless control method speed mine electromotostiv]. *Vostochno-Evropeiskii Zhurnal Peredovykh Tekhnologii Publ.* Kharkov, 2014, vol.4/9 (70), pp. 59 – 63.

10. Chernaya V. O. *K voprosu analiza povrezhdeniy tyagovyih dvigateley shahtnyih elektrovozov* [On the analysis of damage to electric traction motor shaft]. *First Ukrainian scientifically conference of students and young scientists.* Dnipropetrovsk, 2013, pp. 421–422.

11. NPAOP 10.0 – 1.01 – 05. *Pravila bezpeki u vugl'nyh shahtah* [Your safety in mines. 10.0–1.01–05], Lugansk, 2005, *Kopitsentr Publ.*, 196 p.

12. Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna, 1979, Sweden *Information of ASEA*. 212 p.

13. Butt Yu.F., Gryaduschiy V.B., Debelyj V.L., Koval A.N., Furman A.L. *Shahtnyiy podzemniy transport: spravochnoe izdanie. Shahtnyiy lokomotivniy i relsoviy transport* [Mine underground transport: reference book. Mine locomotive and rail transport], Donetsk, *VIK Publ.*, 2009, Vol. 1, 481 p.

14. Rozenfeld V. E., Isaev I. I., Sidorov N. K., Ozerov M. S. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction], Moscow, *Transport Publ.*, 1995, 294 p.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Сінолиций А. Ф.

У статті наведено аналіз та оцінка якісних показників і особливостей функціонування існуючих пристроїв контролю температури і вимірювачів швидкості руху рудничних електровозів, які використовуються в електромеханічних системах з тяговими двигунами постійного струму з послідовним збудженням на сучасних шахтах. Авторами встановлено основні причини їх низької надійності. Запропоновано спосіб безконтактного управління і захисту тягових двигунів від неприпустимого перевищення рівня температури в камерах, який вимагає створення відповідних датчиків температури. Розглянуто питання контролю швидкості рудничних електровозів з метою підвищення безпеки праці гірників на підземному транспорті. Проаналізовано існуючі прилади, які безпосередньо або опосередковано пов'язані з обертовими елементами електровоза. Авторами запропоновано спосіб безконтактного контролю і захисту тягових двигунів від перевищення температури і бездатчиковий вимірювач швидкості руху рудничного електровоза, функціонування якого базується тільки на електричних параметрах тягових електричних двигунів.

Ключові слова: тяговий двигун; електровоз; контроль; захист; надійність; температура; швидкість; датчик; вимірювач; пошкодження.

УДК 622.625.28

О. Н. СИНЧУК, Э. С. ГУЗОВ, И. О. СИНЧУК (ГВУЗ «КНУ»), В. О. ЧЕРНАЯ (КрНУ)

ГВУЗ «Криворожский национальный университет», кафедра Автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте, Украина, г. Кривой Рог, ул. XXII Партсъезда, 11, тел.: (056) 409-17-30, эл. почта: speet@ukr.net

Кременчугский национальный университет имени М. Остроградского, кафедра Систем электропотребления и энергетического менеджмента, Украина, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (067) 8575375, эл. почта: chornajav@gmail.com

К ВОПРОСУ КОМПЛЕКСНОСТИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

В статье приведены анализ и оценка качественных показателей и особенностей функционирования существующих устройств контроля температуры и измерителей скорости движения рудничных электровозов, которые используются в электромеханических системах с тяговыми двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением в современных шахтах. Авторами установлены основные причины их

© Сінчук О. М. та ін., 2015

низкой надежности. Предложен способ бесконтактного управления и защиты тяговых двигателей от недопустимого превышения уровня температуры в камерах, который требует создания соответствующих датчиков температуры. Рассмотрены вопросы контроля скорости рудничных электровозов с целью повышения безопасности труда горнорабочих на подземном транспорте. Проанализированы существующие speedometers, которые напрямую или косвенно связаны с вращающимися элементами электровоза. Авторами предложен способ бесконтактного контроля и защиты тяговых двигателей от превышения температуры и бездатчиковый измеритель скорости движения рудничного электровоза, функционирование которого основывается только на электрических параметрах тяговых электрических двигателей.

Ключевые слова: тяговый двигатель; электровоз; контроль; защита; надежность; температура; скорость; датчик; измеритель; повреждения.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Синолицкий А. Ф.*

UDC 622.625.28

O. N. SINCHUK, E. S. GUZOV, I. O. SINCHUK (SIHE «KNU»), V.O. CHORNA (KrNU)

State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», Department of Automatic Electromechanic System in Industry and Transport, Ukraine, Krivoy Rog, st. XXII Parts'ezda, 11, tel.: (056) 409-17-30, e-mail: speet@ukr.net

Kremenchuk Mykhailo Ostohrads'kyi National University, Assistant of Department of Systems of Power Consumption and Power Management, Ukraine, Kremenchuk, st. Pervomayskaya, 11, tel.: (067) 85753756 e-mail: chornajav@gmail.com

TO THE QUESTION OF THE COMPLEXITY OF THE CONTROL OPERATION PARAMETERS OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES

Analysis and evaluation of quality indicators and functioning of existing control devices and temperature gauges speed mine electric locomotives, which are used in Electromechanical systems, traction motors DC series excitation in modern mines that are listed in the article. The authors found the main reasons for their low reliability. The method of non-contact control and protection of traction motors from impermissible exceeding of the temperature level in the cells, which requires creating the appropriate temperature sensors was proposed. The issues of speed control mine electric locomotives with the aim of improving health and safety of miners in underground transport were considered. The authors reviewed existing speedometers that are directly or indirectly connected with the rotary elements of the locomotive. The authors proposed a method for the contactless control and protection of traction motors from overheating and sensorless meter speed mine locomotive, the operation of which is based only on the electrical parameters of the electric traction motors.

Keywords: traction engine; locomotive; control; protection; safety; temperature; speed; sensor; meter; damage.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Sinolytsiy A. F.*

Н. О. ЛОГВІНОВА (ДНУЗТ)

Кафедра «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел.: (067) 524-43-22, ел. пошта: nata4ka@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-0730-247X

ОПТИМІЗАЦІЯ ХОДОВОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ НАПРЯМКУ В УМОВАХ ЕНЕРГООПТИМАЛЬНОГО ГРАФІКУ РУХУ ПОЇЗДІВ

Постановка проблеми

Основним документом, який регламентує роботу залізниці - графік руху поїздів, основою якого є перегінний час руху поїздів різних категорій (вантажних, пасажирських, місцевих). Перегінний час ходу значною мірою впливає на технічну та дільничну швидкість вантажних поїздів, обіг та потрібний парк вагонів та локомотивів. Час руху поїздів по перегонам встановлюється за тяговими розрахунками в залежності від маси поїзда та тягових характеристик локомотивів, які слідує в голові поїздів.

На перегонах на час ходу вантажних поїздів впливають такі основні фактори: повздовжній план і профіль колії, маса поїздів, що обертаються на ділянці, діючи обмеження швидкості, технічні характеристики локомотивів, факт локомотивних бригад. Розрахунковий перегінний час ходу поїздів виконується для умов максимального використання потужності локомотивів при збільшенні ходової швидкості, що приводить до коливань витрат енергетичних ресурсів на перевезення. При збільшенні ходової швидкості поїздів – збільшуються енергетичні витрати на перевезення.

При застосуванні на Укрзалізниці прискореного руху пасажирських поїздів, збільшується кількість обгонів пасажирськими поїздами вантажних, що приводить до зупинок на станціях останніх та подальшого розгону після обгону. Таким чином, необхідно оцінити вплив відношення різниці в швидкостях пасажирських і вантажних поїздів на витрати енергетичних ресурсів, які використовують вантажні поїзда.

Аналіз останніх досліджень

Дослідження проблем збільшення швидкостей руху поїздів мало місце в роботах великої кількості вчених. Практично всі їх можливо поділити на дві групи:

- до першої групи віднести дослідження направлені на економіко-математичні моделі, які мінімізують витрати залізниці на перевезення,

пов'язані з прискоренням просування вантажопотоків [1, 2, 3];

- до другої групи віднести дослідження з оптимізації маси та швидкості вантажних поїздів з точки зору використання максимальної пропускної спроможності залізничних напрямків [4, 5].

Проблема оптимізації маси та швидкості руху поїздів досліджувалися закордонними вченими [6, 7, 8]. В цих роботах поставлена проблема вирішувалась лише для пасажирського руху.

Загальним недоліком цих робіт є недостатній облік фактора паливно-енергетичних ресурсів.

Мета та задачі

Метою дослідження є розробка методики визначення раціональних швидкостей руху пасажирських та вантажних поїздів на залізничному напрямку Знам'янка – Одеса. Основною задачею дослідження є оцінка впливу ходових швидкостей руху вантажних поїздів на параметри функціонування інфраструктури електрифікованого змінним струмом залізничного напрямку Знам'янка – Одеса.

Виклад основного матеріалу

Інфраструктура залізничного напрямку Знам'янка – Одеса є двохколісною, але в місцях з важким рельєфом місцевості в районі дільничної станції Помічна є одноколіїні вставки, а на мостових переходах обмеження маси руху поїздів по штучним спорудам.

Витрати по перевезенню вантажів можливо розділити на дві складові:

- постійні і не залежні від об'єму перевезень (витрати по обслуговуванню постійних пристроїв інфраструктури);

- залежні - безпосередньо визначаються інтенсивністю завантаження елементів мережі вантажними і пасажирськими поїздопотоками.

Витрати на двохколіїній ділянці і ділянці з двохколіїними вставками залізничного напрямку Знам'янка – Одеса досліджені в роботі [9].

Вплив прискореного та швидкісного руху пасажирських поїздів на вантажні відобража-

ється завдяки коефіцієнту зйому, розміри якого в залежності від швидкості руху досліджені в роботі [10].

Актуальність розвитку і удосконалення методів управління рухом поїздів пов'язано з необхідністю використання критеріїв мінімуму вартості електроенергії, спожитої на тягу поїздів, в той час як у більшості випадків застосовують на залізниці критерій мінімуму спожитої електроенергії. Одночасно з цим виникають додаткові проблеми щодо зміни планування і організації процесу перевезень.

Вибір оптимальних режимів руху поїздів є однією з основних задач залізничного транспорту. Задача оптимального руху поїздів, в першу чергу, визначається повнотою обліку сукупності факторів, які характеризують дільницю, моделлю поїздів, різноманітними факторами і умовами процесу руху поїздів по змінному профілю колії, а також силами, які при цьому виникають і т.д.

На основі даних про залізничну дільницю (поїзд, локомотив, час руху, обмеження швидкості, тарифи, які застосовуються на електроенергію та ін.) розраховується оптимальний за вартістю режим ведення поїзда у виді карти дільничних швидкостей або перегінних часів ходу.

Отримані результати можуть бути основою методики оцінювання економічної ефективності застосування змінних тарифів і вартісної організації процесу перевезень на електрифікованій дільниці та умов ОРЕ, а також створення такої технології.

При характеристиці задачі вибору оптимальних режимів ведення поїздів необхідно враховувати такі параметри, як координати колії і часу; управління (номер позиції контролера); швидкість центру маси поїзда; маси локомотива і поїзда; коефіцієнт інерції мас, які обертаються; прискорення сили тяжіння; сила тяги локомотива; опір поступального руху поїзда; діюча на поїзд гальмівна сила; температура перегріву тягових електродвигунів; теплові характеристики і струм тягового електродвигуна, сумарна сила натискання гальмівних колодок; напруга контактної мережі; сукупність випадкових факторів задачі. Крім того, необхідно враховувати наступні характеристики – активний струм електровозу, еквівалентний опір тягової мережі, тарифи на оплату електроенергії.

В умовах концепції Укрзалізниці по скороченню нічних пасажирських поїздів з заміною їх на денні експresi, денний час доби буде зайнятий пасажирськими перевезеннями, а з урахуванням коефіцієнтів зйому вантажних поїздів

значний обсяг вантажних перевезень прийде на нічний час.

Висока міра кореляції між характеристиками маса поїздів брутто і енергоспоживання на тягу поїздів, відома з дослідження [11], дає можливість побудови ефективних інформаційних систем регулювання енергоспоживання.

Характеристики поїздопотоків в часі по відомих маршрутах руху служать вихідними даними для алгоритмів розрахунків оптимальних інтервалів між поїздами і маси поїздів, які мінімізують витрату електроенергії на тягу.

Важливим сучасним напрямком залізничних перевезень на електрифікованих ділянках постає задача зменшення постійно зростаючих питомих витрат на спожиті енергоресурси та вартість електроенергії. Залежність між обсягами перевезень, енергоспоживанням на тягу поїздів отримані за результатами досліджень тягово-енергетичної лабораторії Одеської залізниці. Розрахунки споживання електроенергії на тягу поїздів на напрямку Знам'янка – Помічна - Колосівка – Одеса-Сортувальна, виконані для вантажних поїздів, показали відмінності в показниках вартості ефективності.

В роботі [11] представлені графіки фактичного споживання електроенергії при веденні вантажних та пасажирських поїздів на напрямку. Варто зазначити важливу особливість організації процесів перевезень, оптимальних по критерію мінімуму вартості спожитої на тягу електроенергії. При вартісній оптимізації для дільниць необхідно створення пакету режимних карт, кожна з яких повинна використовуватись в різні періоди доби.

Економіко-математична модель оптимізації швидкості руху вантажних поїздів по критерію мінімізації витрат залізниці, яка включає в себе не тільки витрати на паливно-енергетичні ресурси, а і витрати, пов'язані з експлуатацією локомотивів і роботою локомотивних бригад має вигляд

$$C = C_{\text{ел}} + C_{\text{лок}} + \Rightarrow \min, \quad (1)$$

де $C_{\text{ел}}$ – витрати, пов'язані з використанням електроенергії при пропуску вантажного поїзда по залізничному напрямку без зупинок, грн.;

$C_{\text{лок}}$ – експлуатаційні витрати, віднесені до використання електроенергії на власні потреби електровоза та локомотивної бригади, які віднесені на весь час знаходження вантажного поїзда на напрямку, грн.;

Витрати, пов'язані з використанням електроенергії при пропуску вантажних поїздів по напрямку розраховується за формулою

$$C_{\text{ел}} = W \cdot e_{\text{ел}} = (W_{\text{ел}} + W_{\text{вл}} + W_{\text{зуп}}) \cdot e_{\text{ел}}, \quad (2)$$

де $e_{\text{ел}}$ – вартість кВт електроенергії, грн.;

$W_{\text{ел}}$ – витрати електроенергії на тягу вантажного поїзда, у випадку слідування його по залізничному напрямку без зупинок, які визначаються за допомогою програми «ГАС Railway», кВт;

$W_{\text{вл}}$ – витрати електроенергії на власні потреби електровоза за весь час знаходження електровоза на залізничному напрямку, кВт;

$W_{\text{зуп}}$ – додаткові витрати електроенергії, пов'язані з зупинками вантажного поїзда для обгону його пасажирським, кВт.

Витрати електроенергії на власні потреби електровоза за весь час знаходження електровоза на залізничному напрямку визначаються за формулою

$$W_{\text{вл}} = \frac{(t_{\text{ход}}^{\text{ван}} + t_{\text{ход1}}^{\text{ван}})}{60} W_{\text{вл}}, \quad (3)$$

де $t_{\text{ход}}^{\text{ван}}$ – час ходу вантажного поїзда по залізничному напрямку, без урахування першої ділянки, хв.;

$t_{\text{ход1}}^{\text{ван}}$ – час ходу вантажного поїзда по першій ділянці напрямку, хв.

$W_{\text{вл}}$ – питомі витрати електроенергії на власні потреби локомотива, кВт/год.

Додаткові витрати електроенергії, пов'язані з зупинками вантажного поїзда для обгону його пасажирським розраховуються за формулою

$$W_{\text{зуп}} = n_{\text{обг}} \cdot w_{\text{зуп}}, \quad (4)$$

де $n_{\text{обг}}$ – кількість обгонів пасажирськими поїздами вантажних на всьому залізничному напрямку, яка визначається відповідно [10];

$w_{\text{зуп}}$ – середні додаткові витрати електроенергії, кВт.

Графік залежності витрат електроенергії на перевезення 1 тони маси поїзда наведено на рис. 1.

Проведеними дослідженнями витрат електроенергії встановлено, що витрати електроенергії на тягу поїздів залежить від характеристики повздовжнього профілю колії та кількості локомотивів. При критичній масі поїзда для одного локомотива різко збільшуються витрати еле-

ктроенергії (4500 т., 6500 т.) та необхідний перехід на збільшення одиниць тягового рухомого складу.

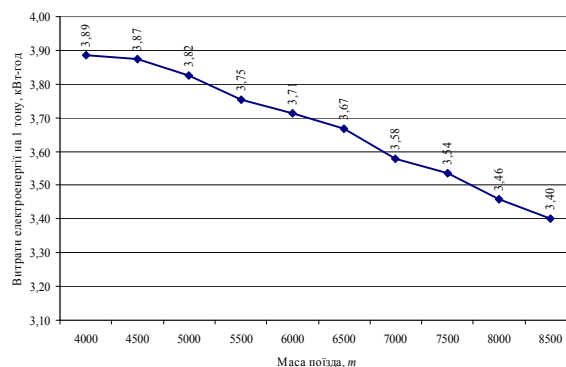


Рис. 1. Графік залежності витрат електроенергії на 1 тону маси поїзда

Аналіз витрат електроенергії на перевезення 1 тони вантажу по залізничному напрямку необхідний для визначення витрат залізниці на перевезення, що є актуальним за умов постійного зростання вартості електроенергії, яка використовується на тягу поїздів.

Згідно з результатами дослідних поїздок тягово-енергетичної лабораторії Одеської залізниці, теоретичних розрахунків і технічного стану локомотивів, норму маси для вантажних поїздів три секційними електровозами ВЛ80с рекомендується встановити 6900 т, чотирьох секційним електровозом – 9200 т.

Ведення поїздів масою більше 6000 т здійснюється з розміщенням електровозів ВЛ80 (дві секції) в голові і хвості состава з об'єднанням гальмівної магістралі. Для попередження розриву поїздів найбільша сумарна сила тяги локомотивів, які знаходяться в голові поїзда, при рушанні поїзда з місця визначається, виходячи із максимально допустимого поздовжнього зусилля на автосцепці при рушанні, рівного 95 тс.

Висновки тягово-енергетичної лабораторії Одеської залізниці свідчать, що по основному напрямку перевезень є можливість ведення поїздів масою до 9000 т. Це можливо при виконанні вище перерахованих заходів щодо режиму ведення поїзда, здійснення експлуатаційних заходів щодо пропуску поїздів по дільниці та встановлення відповідного контролю зі сторони служби колії за станом колій.

Результати моделювання кількості обгонів у варіантних графіках руху поїздів по напрямку Знам'янка – Одеса та загальна кількість зупинок вантажних поїздів, що приходяться на один поїзд графічно зображено на рис. 2.

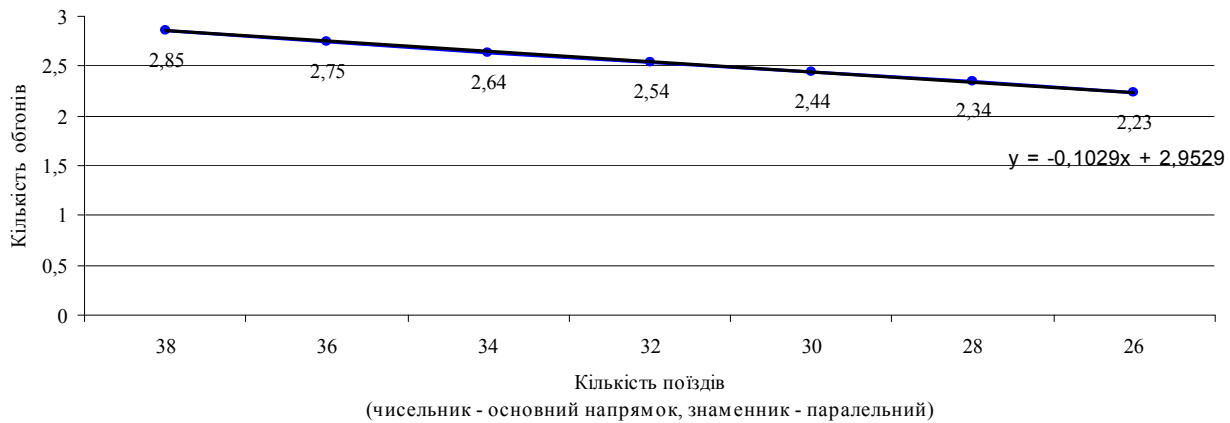


Рис. 2. Графік моделювання кількості обгонів вантажних поїздів на напрямку

За результатами моделювання кількості обгонів вантажних поїздів пасажирськими на ділянці Знам'янка - Одеса, що приходяться на один поїзд при використанні методів регресійного аналізу, необхідно зробити наступні висновки:

- кількість обгонів вантажних поїздів пасажирськими, що приходяться на один вантажний поїзд при зменшенні розмірів руху вантажних поїздів зменшується з 2,85 до 2,44.

- кількість обгонів зменшується за лінійною залежністю від кількості вантажних поїздів за формулою

$$n_{\text{обг}} = -0,1024 \cdot N_{\text{ван}} + 2,9524. \quad (5)$$

На основі системного аналізу були сформульовані мета та задачі дослідження і обрано методи їх вирішення за рахунок мінімізації цільової функції експлуатаційних витрат на перевезення.

Висновки

Проведеними дослідженнями встановлено, що кількість обгонів вантажних поїздів пасажирськими

залежить від ходової швидкості останніх і на залізничному напрямку Знам'янка – Одеса при пропуску 38 пар вантажних поїздів має лінійний характер і складає близько 2 обгонів. Витрати електроенергії, які приходяться на 1 тону маси поїзда на тягу поїздів і власні потреби електровоза залежать від маси поїзда та кількості задіяних локомотивів та зменшуються від 3,89 кВт/год при масі поїзда 4 000 т до 3,40 кВт/год при масі поїзда 8 500 т.

Одним із важливіших факторів, які визначають оптимальну ходову швидкість руху вантажних поїздів є розміри пасажирського руху та різниця швидкості пасажирських і вантажних поїздів. Дослідженнями встановлено, що при збільшенні ходової швидкості вантажних поїздів (при незмінній швидкості пасажирських) тем менші додаткові витрати електроенергії, тому, на залізничних напрямках з великими розмірами пасажирського руху, оптимальна ходова швидкість вантажних поїздів при обліку даного чинника, буде незначно більше чим та, яка отримана при зупинках вантажного поїзда.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакланов, А. А. Принципы выбора энергооптимальных скоростей движения и режима работы электровоза [Текст] / Доклады четвертой Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава». – Новочеркасск: ОмГУПС, 2003. – С. 118 – 120.
2. Бакланов, А. А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов [Текст] / А.А. Бакланов // Транспорт: наука, техника, управление / ВИНТИ. – 2005. - №6. – С. 32 – 35.
3. Полянин, Г.Е. Рекомендации по выбору оптимальных скоростей движения и весовых норм грузовых поездов на участке железной дороги [Текст] /

REFERENCES

1. Baklanov, A. Guidelines on choosing energo-optimalnyh speeds and modes of operation of electric [Text] / Report of the Fourth International Scientific Conference "Status and prospects of development of electric rolling stock." - Novocherkassk: OmGUPS, 2003, pp. 118 – 120.
2. Baklanov, A. The energy balance of the movement to address the problem of reducing energy consumption for traction [Text] / A. Baklanov // Transport: science, technology, management / VINITI, 2005, No. 6, pp. 32 – 35.
3. Polyaniin, G. Guidelines for selecting the optimum speeds and weight standards of freight trains on the railway [Text] / G. Polyaniin // Improving the energy

© Логвінова Н. О., 2015

Г.Е. Полянин // Повышение тягово-энергетической эффективности магистральных электровозов: Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск: ОМИИТ. – 1989. – С. 28 – 34.

4. Малькевич, Н.А. Ресурсосберегающие технологии в поездной работе [Текст] / Н.А. Малькевич, М.И. Шкурин, Н.Ф. Зеньчук // Самарский ин-т инж. ж.-д. транспорта: Межвузовский сб. науч. Трудов. – 2001. – №21. – С. 340 – 344.

5. Кузнецов, В. Г. Розробка наукових принципів зменшення витрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом регулювання транспортного потоку [Текст] / В.Г. Кузнецов, К.О. Калашников // Електрифікація транспорту: науковий журнал. – Д: ДНУЗТ. – 2014. – №8. – С. 104-109.

6. Вебер, П. Ю. К вопросу определения скорости движения на железных дорогах Европы [Текст] / П.Ю. Вебер // Железные дороги мира. -1983. - №5. - С. 2-5.

7. Оптимальные с экономической точки зрения максимальные скорости на Австралийских федеральных железных дорогах [Текст] // Железнодорожный транспорт за рубежом: ЭИ / ЦНИИТЭИ МПС. – 1995. – Сер. 1. – Вып. 5. – С. 5-19.

8. Оценка существующих нормативов ограничения скорости движения поездов (США) [Текст] // Управление, логистика и информатика на транспорте: ЭИ/ВИНИТИ. – 1999. – №15.

9. Логвінова Н.О. Моделювання роботи залізничної інфраструктури з паралельними ходами [Текст] / Н. О. Логвінова, Р. В. Вернигора, О. Ю. Папахов, // Науковий Вісник НГУ. – Д.: НГУ, 2013. – Вип. 3. – С. 93-102.

10. Вернигора Р. В. Аналітичний розрахунок коефіцієнтів зйому вантажних поїздів пасажирськими в умовах швидкісного руху [Текст] / Р.В. Вернигора, О. Ю. Папахов, Н. О. Логвінова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 2/3 (62). – С. 51-55.

11. Логвінова Н. О. Методика визначення собівартості вантажних перевезень на електрифікованих ділянках [Текст]/ Н.О. Логвінова // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 71 між-нар. наук.-практ. конф., 14-15 квітня 2011 р.: тези доп. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ. – 2011. – С. 138-139.

efficiency of the trailer electric locomotives: Interuniversity thematic collection of scientific papers. - Omsk: OMIIT, 1989, pp. 28-34.

4. Malkevich, N, Shkurin, M, Zenchuk, N Resource-saving technologies in the train [Text] / N. Malkevich, M. Shkurin, N. Zenchuk // Samara Inst Ing. railroad Transportation: Intercollegiate Sat scientific. Proceedings, 2001, No. 21, pp. 340 – 344.

5. Kuznetsov, V, Kalashnikov K. Rozrobka naukovykh printsipiv zmenshennya vitrat elektroenerhii in tyagoviy merezhi postynogo struma shlyakhom reguluvannya traffic flows [Text] / V. Kuznetsov, K. Kalashnikov // Electrification of transport. D: DNURT, 2014, No. 8, pp. 104-109.

6. Weber, P. On the question of determining the speed of railways in Europe [Text] / P. Weber // Railways of the world, 1983, No. 5, pp. 2-5.

7. The optimal from an economic point of view, the maximum speed on the Australian Federal Railways [Text] // Rail abroad: EI / TSNIITEI MPS, 1995, Ser. 1, No. 5, pp. 5-19.

8. Assessment of existing regulations limit the speed of trains (USA) [Text] // management, logistics and informatics in transport: EI / VINITI, 1999, № 15.

9. Logvinova N. Modelyuvannya roboty zaliznichnoyi infrastrukturi z parallelnymy hodamy [Text] / N. Logvinova, R. Vernigora, A. Papakhov, Naukova // News of the NSU. D.: NSU, 2013, Iss. 3, p. 93-102.

10. Vernigora R. Analitichny rozrahunok koefitsiyentiv zyonu vantazhnykh poyizdiv pasazhirskimi v umovakh shvidkysnogo ruhu [Text] / R. Vernigora, A. Papakhov, N. Logvinova // Shidno-Yevropeyskiy Journal peredovykh tehnologiy, 2013, No 2/3 (62), pp. 51-55.

11. Logvinova N. Methodyka viznachennya sobivartosti vantazhnykh perevezen na elektrifikovanih dilyankah [Text] / N. Logvinova // Problemy ta perspektyvy rozvitku zaliznicnovo transporut: 71 mizhnar. nauk.-pract. conf., 2011, Dnipropetrovsk: DNURT, 2011, pp. 138-139.

Надійшла до друку 04.06.2015.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

Метою дослідження є розробка методики визначення раціональних швидкостей руху пасажирських та вантажних поїздів на залізничному напрямку Знам'янка – Одеса. Основною задачею дослідження є оцінка впливу ходових швидкостей руху вантажних поїздів на параметри функціонування інфраструктури електрифікованого змінним струмом залізничного напрямку Знам'янка – Одеса. Об'єктом дослідження виступає електрифікований змінним струмом залізничний напрямок Знам'янка – Одеса. Предметом дослідження є процес пропуску вантажних поїздів по залізничному напрямку Знам'янка – Одеса з різними нормами маси. Методом дослідження є системний підхід до поставленої проблеми пропуску вантажних поїздів різної маси на залізничному напрямку. Науковою новизною є визначення раціональних швидкостей руху вантажних поїздів різної маси при прискореному русі пасажирських поїздів.

Ключові слова: швидкість руху поїздів; енергозберігаючий графік руху; маса поїзда.

УДК 656.212

Н. А. ЛОГВИНОВА (ДНУЖТ)

Кафедра «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел.: (067) 524-43-22, эл. почта: nata4ka@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-0730-247X

ОПТИМИЗАЦИЯ ХОДОВОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ НАПРАВЛЕНИИ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГООПТИМАЛЬНОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Целью исследования является разработка методики определения рациональных скоростей движения пассажирских и грузовых поездов на железнодорожном направлении Знаменка - Одесса. Основной задачей исследования является оценка влияния ходовых скоростей движения грузовых поездов на параметры функционирования инфраструктуры электрифицированного переменным током железнодорожного направления Знаменка - Одесса. Объектом исследования выступает электрифицированный переменным током железнодорожное направление Знаменка - Одесса. Предметом исследования является процесс пропуска грузовых поездов по железнодорожному направлению Знаменка - Одесса с различными нормами массы. Методом исследования является системный подход к поставленной проблеме пропуска грузовых поездов разной массы по железнодорожному направлению. Научной новизной является определение рациональных скоростей движения грузовых поездов разной массы при ускоренном движении пассажирских поездов.

Ключевые слова: скорость движения поездов; энергосберегающий график движения; масса поезда.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 656.212

N. A. LOGVINOVA (DNURT)

Department of management of operational work, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan st. Lazaryan, 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel.: (067) 524-43-22, e-mail: nata4ka@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-0730-247X

OPTIMIZATION UNDERCARRIAGE VELOCITY OF FREIGHT TRAINS ON RAILWAY DIRECTION UNDER OPTIMAL BY ENERGY TRAIN SCHEDULE

The aim of the study is to develop a methodology for determining the rational speeds of passenger and freight trains on the railway direction Znamenka - Odessa. The main objective of the study is to assess the impact of running speeds of freight trains on electrified infrastructure parameters of alternating current rail Znamianka - Odessa. Object of research supports AC electrified railway line Znamianka - Odessa. The subject of research is the process of crossing freight trains on the railway Znamianka - Odessa with different rules of supply. The method of research is a systematic approach to the problem of freight trains crossing different mass on the rail direction. Scientific novelty is the definition of rational speeds of freight trains of varying weight at an accelerated movement of passenger trains.

Keywords: train speed; energy-efficient schedule; weight train.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

О. Л. МАРЕНИЧ, К. С. СЕМЕНЮК (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна,
49010, м. Дніпропетровськ, Україна, вул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47,
ел. пошта: oksana.marenich17@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-3602-5851

АЛЬТЕРНАТИВНЕ ОБІГРІВАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ ВИЩОГО НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ

Вступ

Опалення об'єктів житлового і громадського призначення є одним із найбільш витратних технологічних процесів. Системи електроопалення повинні бути не тільки комфортними та екологічними, а й енергоефективними. Електроопалення дозволяє зменшити використання природного газу. За останні роки електроопалення набуває широкого розповсюдження в багатьох країнах світу. Опалення – важливий фактор забезпечення потрібного мікроклімату в будь-якому приміщенні, в тому числі і в навчальних лабораторіях вищого навчального закладу. Мікроклімат має суттєвий вплив на продуктивність праці. Основним фактором мікроклімату є температура в приміщенні.

Мета та завдання

Провести дослідження для отримання вихідних даних які потрібні для заміни традиційного радіаторно-водяного опалення в лабораторії на електричне. При цьому необхідно обрати спосіб вентиляції приміщення, типи електричних нагрівачів, об'єми припливного та витяжного повітря при яких температура в лабораторіях буде забезпечена 18 °C згідно існуючих умов.

Постановка задачі

Електричне опалення приміщень більш зручне в експлуатації, більш комфортне та вигідніше економічно в порівнянні з водяними системами, в яких тепло отримують шляхом спалення палива в котлах. Пропонується система електроопалення навчальної лабораторії як альтернатива існуючому централізованому радіаторно-водяному опаленню з використанням газу в центральній котельній у холодний та перехідний періоди року. При цьому в якості опалювальних пристроїв використані сучасні інфрачервоні обігрівачі.

Матеріали і результати досліджень

Для вирішення задачі заміни існуючого водяного опалення на електричне в навчальній лабораторії складено рівняння теплового балансу приміщення цієї лабораторії [1]. Пропонується обладна-

ти лабораторію припливно-витяжною системою вентиляції. Швидкість повітря в робочій зоні приймаємо $1-1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ як для лабораторії, у якій максимальне значення допустимої концентрації шкідливих речовин, що виділяється під час роботи, менше 0.1 мг/м^2 [2].

Припливно-витяжна система вентиляції – ефективна система вентиляції, яка забезпечує найбільш якісний повітряний обмін у приміщенні. Вона одночасно працює на витягування забрудненого повітря із приміщення та на подачу свіжого повітря у приміщення. Для створення найбільш комфортного мікроклімату в лабораторії застосуємо механічну вентиляцію, при якій повітряний обмін організується за рахунок застосування спеціального обладнання і пристроїв: вентиляторів, нагрівачів, тощо [3,4,5]. Така система вентиляції дозволяє створити в лабораторії мікроклімат з достатньою кількістю кисню, усунути з неї неприємні запахи, надлишки тепла і шкідливі речовини [6]. Обираємо схему організації повітряного обміну «зверху – вверху», яка доцільна для навчальної лабораторії. Приймаємо рішення, що в навчальній лабораторії буде один приплив – одна витяжка (приміщення із загальнообмінною вентиляцією). Рециркуляція повітря в системах повітряного опалення навчальних приміщень не допускається.

Приймаємо схему подачі повітря прямооточними струменями за допомогою повіторозподільних пристроїв, розташованих вище робочої зони – рис.1.

Подачу припливного повітря в приміщення лабораторії приймаємо на рівні 2,5-3 м, як для приміщення з незначним виділенням вологи [1]. Вказаний рівень не перевищує рекомендованого (не більше 4 м) і є раціональним для переміщення тепла, що буде йти від електронагрівачів, які плануються розташувати на стелі.

У загальному випадку складають рівняння теплового балансу приміщення по повному теплу та по явному теплу. Джерелами теплонаходжень у приміщеннях є люди, технологічне обладнання, прилади освітлення тощо.

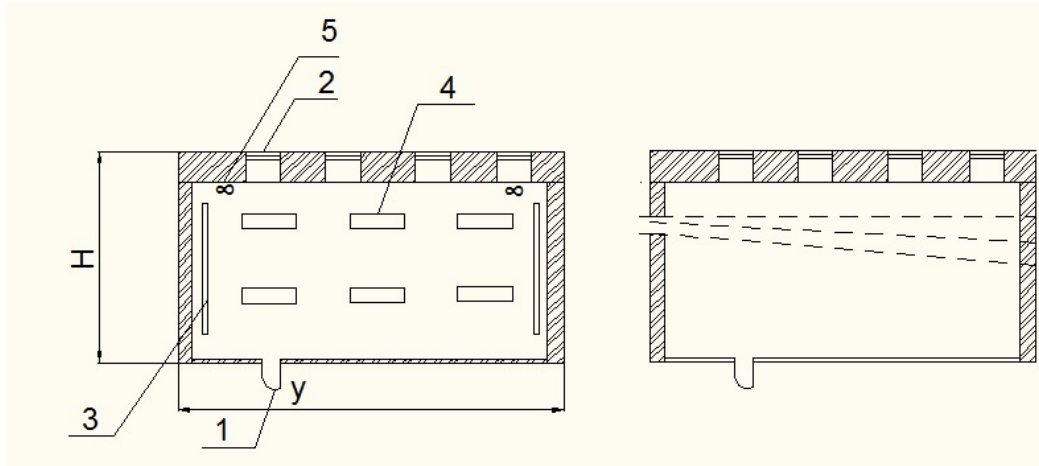


Рис. 1. Схема приміщення та схема подачі повітря прямоточними струменями:
1 – двері, 2 – вікно, 3 – повітропровід, 4 – нагрівач, 5 – вентилятор

Тепло від джерел надходить у приміщення конвекцією та випромінюванням. Ці теплонадходження називають надходженнями явного тепла, так як вони приводять до підвищення температури приміщення. Надходження тепла у повітря приміщення у вигляді парів називають надходженнями прихованого тепла, тому що, збільшуючи ентальпію повітря, вони не змінюють його температуру.

Вважаємо, що в досліджуваній навчальній лабораторії приховане тепло практично відсутнє, тому що відсутні джерела парів. Парами, що виділяють люди (30 чоловік), нехтуємо через їх малу кількість. Сумарні (повні) надходження – це сума усіх надходжень тепла у приміщення. Надмірне тепло – це різниця сумарних теплонадходжень і сумарних тепловтрат у приміщенні. Припускаємо, що у лабораторії присутнє тільки явне тепло, у цьому випадку рівняння теплового балансу в приміщенні лабораторії має вигляд

$$Q_{\text{надм}}^{\text{я}} + c_{\text{п}} G_{\text{пр}} t_{\text{пр}} - c_{\text{п}} G_{\text{в}} t_{\text{в}} = 0, \quad (1)$$

де $Q_{\text{надм}}^{\text{я}}$ – надмірне тепло, $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$; $c_{\text{п}}$ – питома теплоємність повітря, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $c_{\text{п}} = 1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $t_{\text{пр}}$ – температура припливного повітря, $^{\circ}\text{K}$; $t_{\text{в}}$ – температура повітря, що видаляється із приміщення, $^{\circ}\text{K}$; $G_{\text{пр}}$ – вага повітря, яке подається у приміщення, $\frac{\text{кг}}{\text{год}}$; $G_{\text{в}}$ – вага повітря, що видаляється із приміщення, $\frac{\text{кг}}{\text{год}}$.

У лабораторії надходження явного тепла відбувається від людей $Q_{\text{л}}$, джерел штучного освітлення $Q_{\text{осв}}$ та нагрівача $Q_{\text{нагр}}$ (мається на увазі холодна та перехідна пори року). Припускаємо, що навчальні стенди призначені для роботи з малопотужними напівпровідниковими приладами, які під час проходження через них номінальних струмів практично не виділяють тепла, що вплинуло би на температуру приміщення.

Втрати тепла приміщенням відбуваються в результаті інфільтрації зовнішнього повітря через вікна. Як правило, інфільтрація крізь стіни і стикові з'єднання у стінах незначна, хоча й може привести до небажаного місцевого зниження температури внутрішньої поверхні стіни. У лабораторії, стіни якої із цегли, інфільтрація практично відсутня. Позначимо теплові втрати від інфільтрації зовнішнього повітря через $Q_{\text{ін.прим.}}$, тоді

$$Q_{\text{надм}}^{\text{я}} = (Q_{\text{л}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{нагр}}) - Q_{\text{ін.прим.}} \quad (2)$$

За [1] визначаємо, що при виконанні робіт легкої тяжкості, до якої ми відносимо роботу по виконанню лабораторних робіт і практичних занять в лабораторії, при температурі 20°C одна людина виділяє 99 Вт тепла. Отже, тепловиділення від n людей складають

$$Q_{\text{л}} = 99n, \quad (3)$$

де n – кількість людей, що працюють в лабораторії.

Теплонадходження від джерел штучного освітлення

$$Q_{\text{осв}} = E F g_{\text{осв}} \eta_{\text{осв}}, \quad (4)$$

де E – освітленість, лк. $E = 300$ лк [1]; F – площа приміщення, м²; $g_{\text{осв}}$ – питомі тепло-виділення, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{лк}}$. $g_{\text{осв}} = 0,102 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{лк}}$ [1]; $\eta_{\text{осв}}$ – доля тепла, що надходить у приміщення.

Приймаємо, що в лабораторії люмінесцентні світильники – дифузійного розсіяного світла. Усі світильники знаходяться у приміщенні лабораторії. Тому повна енергія, що витрачається на освітлення, переходить у тепло, яке підігріває повітря приміщення, $\eta_{\text{осв}} = 1$ [1].

Потужність нагрівача (тепловиділення від електричного нагрівання)

$$N_{\text{нагр}} = Q_{\text{нагр}} = G'_{\text{пр}} p_{\text{п}} c_{\text{п}} \times (t_{\text{лаб}} - t_{\text{п.зовн}}) \quad [5], \quad (5)$$

де $p_{\text{п}}$ – густина повітря. $p_{\text{п}} = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ [7];

$t_{\text{лаб}}$ – температура, що підтримується у приміщенні лабораторії, К.

Вага повітря, яке подається у приміщення

$$G_{\text{пр}} = V_{\text{пр.люд}} \cdot n \cdot \gamma, \quad (6)$$

де γ – вагова густина повітря при тиску 760 мм.рт.ст і $t = 20$ °С [1].

А з урахуванням впливу нещільностей $G'_{\text{пр}} = 1,05 \cdot G_{\text{пр}}$, де 1,05 – коефіцієнт, що враховує вплив нещільностей [1].

Визначаємо теплові втрати від інфільтрації зовнішнього повітря. R_i – опір вікон проникненню повітря.

$$\text{Приймаємо } R_i = 1,15 \text{ Па} \frac{2}{3} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

Одиниця витрат повітря для вікон [1]:

$$j_{\Delta p_{\text{в}}} = 0,378 (H_{\text{в}} \Delta \gamma)^{\frac{2}{3}} / R_i \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}, \quad (7)$$

де $H_{\text{в}}$ – висота вікна, м;

$\Delta \gamma = \gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{в}}$, де $\gamma_{\text{н}}, \gamma_{\text{в}}$ – відповідно питома вага з навітряного (зовнішнього) боку та внутрішнього повітря, Н/м³.

Відносний тиск вітру при

$$p_{\text{н}} = \gamma_{\text{н}} \cdot 9,8 = 14,37 \cdot 9,8 = 1,47 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$p_{\text{в}} = [C_{\text{н}} - (-C_3)] v^2 p_{\text{н}} / (2 H_{\text{в}} \Delta \gamma), \quad (8)$$

де $C_{\text{н}}, C_3$ – аеродинамічні коефіцієнти відповідно на фасаді з навітряного боку та на фасаді із завітряного боку.

Енергетичний сенс аеродинамічного коефіцієнту в тому, що його значення показує у долях одиниці яка частина питомої кінетичної енергії потоку повітря переходить у питому потенційну енергію. Для найбільш поширеної форми будівлі (паралелепіпед) аеродинамічні коефіцієнти мають наступні значення: $C_{\text{н}} = 0,8$; $C_3 = -0,3 \dots -0,6$ [8]. Приймаємо: $C_{\text{н}} = 0,8$; $C_3 = -0,4$;

v – швидкість вітру, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Витрати зовнішнього повітря, яке інфільтрується в приміщенні лабораторії [1]

$$G_{\text{i.пр}} = j_{\Delta p_{\text{в}}} B_{\text{i.пр}} \cdot F_1 \quad (9)$$

де F_1 – площа вікон, м²;

$B_{\text{i.пр}}$ – коефіцієнт, який показує, скільки одиниць витрат повітря складає інфільтрація у даному приміщенні.

Тепловитрати на нагрівання зовнішнього повітря, яке інфільтрується через вікна [1]:

$$Q_{\text{i.пр}} = c_{\text{п}} G_{\text{i.пр}} A (t_{\text{в}} - t_{\text{пр}}) \quad (10)$$

де $c_{\text{п}} = 1,005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – питома теплоємність повітря; A – коефіцієнт, який враховує підігрів повітря, який інфільтрується через вікна.

Відповідно до рівняння (1)

$$G_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{надм}} + c_{\text{п}} G_{\text{пр}} t_{\text{пр}}}{c_{\text{п}} t_{\text{пр}}}.$$

З урахуванням впливу нещільностей $G'_{\text{в}} = \frac{G_{\text{в}}}{1,05}.$

Об'єм повітря, яке видаляється із приміщення лабораторії:

$$v_{\text{в}} = \frac{G'_{\text{в}}}{\gamma}.$$

Чисельний приклад

З використанням вищенаведених виразів розрахуємо об'єми припливного та витяжного повітря для приміщення реальної навчальної лабораторії (кафедра «Електротехніка та елект-

ромеханіка» ДНУЗТ), для якої нормативна площа на одного чоловіка може бути прийнята

$$3,6 \frac{\text{м}^2}{\text{чол}} [2].$$

Вказана лабораторія має площу

$$5,7 \text{ м} \cdot 12,35 \text{ м} = 70,4 \text{ м}^2, \quad \text{тобто} \quad \frac{70,4 \text{ м}^2}{30 \text{ чол}} =$$

$$= 2,35 \frac{\text{м}^2}{\text{чол}}.$$

У порівнянні з нормативним значенням при роботі в лабораторії групи із 30 чоловік площа на одну людину зменшується у $\frac{3,6}{2,35} = 1,53$ рази. З точки зору кліматичних умов цей недолік можна компенсувати, суттєво збільшивши кратність обміну повітря з

$$20 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} [9]$$

до $20 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \cdot 1,53 = 30,6 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$. Тобто об'єм припливного повітря на людину

$$V_{\text{пр.люд}} = 30,6 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Рівняння теплового балансу в приміщенні лабораторії

$$Q_{\text{надм}}^{\text{я}} = (Q_{\text{л}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{нагр}}) - Q_{\text{ін.прим.}}$$

Теплонадходження від людей

$$Q_{\text{л}} = 99n = 99 \cdot 30 = 2970 \text{ Вт} = 2,97 \text{ кВт}.$$

Теплонадходження від джерел штучного освітлення

$$Q_{\text{осв}} = EFg_{\text{осв}}\eta_{\text{осв}} = 300 \cdot 70,4 \cdot 0,102 \cdot 1 =$$

$$= 2154,24 \text{ Вт} = 2,15 \text{ кВт}$$

Потужність нагрівача (тепловиділення від електричного нагрівання)

$$N_{\text{нагр}} = Q_{\text{нагр}} = G'_{\text{пр}} p_{\text{п}} c_{\text{п}} (t_{\text{лаб}} - t_{\text{п.зовн}}).$$

$$t_{\text{лаб}} = 20 + 273,15 = 293,15 \text{ К}.$$

$$G_{\text{пр}} = 30,6 \cdot 30 \cdot 1,225 = 1124,6 \frac{\text{кг}}{\text{год}}.$$

$$G'_{\text{пр}} = 1124,6 \cdot 1,05 = 1180,83 \frac{\text{кг}}{\text{год}}.$$

$$N_{\text{нагр}} = Q_{\text{нагр}} = G'_{\text{пр}} p_{\text{п}} c_{\text{п}} (t_{\text{лаб}} - t_{\text{п.зовн}}) =$$

$$= 1180,83 \cdot 1,29 \cdot 1,005 (293,15 - 274,15) =$$

$$= 29086,85 \frac{\text{кДж}}{\text{год}} = \frac{29086,85}{3600} \approx 8,08 \text{ кВт}$$

Тепловитрати на нагрівання зовнішнього повітря, яке інфільтрується через вікна

$$p_v = [C_{\text{н}} - (-C_3)] v^2 p_{\text{н}} / (2H_{\text{в}} \Delta\gamma)$$

Приймаємо $v = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ (за даними гідрометеоцентру як середнє значення в осінньо-зимовий період для м. Дніпропетровськ).

$$H_{\text{в}} = 2,13 \text{ м}.$$

$$p_v = [0,8 - (-0,4)] \cdot 4^2 \cdot 1,47 /$$

$$/ (2 \cdot 2,13 \cdot 2,67) = 2,48 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$G_{\text{і.пр}} = j \Delta p_{\text{в}} B_{\text{і.пр}} \cdot F_1.$$

В лабораторії чотири вікна розміром 2,13 м · 1,96 м кожне. Тоді $F_1 = 4 \cdot 2,13 \cdot 1,96 = 16,7 \text{ м}^2$.

$$B_{\text{і.пр}} = 2,1 \text{ для } p_v = 2,48 [1].$$

$$j \Delta p_{\text{в}} = 0,378 (H_{\text{в}} \Delta\gamma)^{\frac{2}{3}} / R_i.$$

$$\gamma_{\text{н}} = 14,37 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}, \quad \gamma_{\text{в}} = 11,7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}, \quad \Delta\gamma = 2,67 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3},$$

$\frac{2}{3}$ – показник для вікон.

$$j \Delta p_{\text{в}} = 0,378 (2,13 \cdot 2,67)^{\frac{2}{3}} /$$

$$/ 1,15 = 1,045 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{ год}}.$$

$$G_{\text{і.пр}} = 1,045 \cdot 2,1 \cdot 16,7 = 36,65 \frac{\text{кг}}{\text{год}}.$$

$$Q_{\text{і.пр}} = c_{\text{п}} G_{\text{і.пр}} A (t_{\text{в}} - t_{\text{пр}}).$$

Для двійного засклення вікон $A = 1 [1]$.

$$Q_{\text{і.пр}} = 1,005 \cdot 36,65 \cdot 1 (293,15 - 274,15) =$$

$$= 699,83 \frac{\text{кДж}}{\text{год}} = 0,19 \text{ кВт}.$$

Згідно з (2) $Q_{\text{надм}}^{\text{я}} = (2,97 + 2,15 + 8,08) -$

$$- 0,19 = 13,01 \text{ кВт} = 46836 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Відповідно до рівняння (1)

$$G_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{надм}}^{\text{я}} + c_{\text{п}} G_{\text{пр}} t_{\text{пр}}}{c_{\text{п}} t_{\text{пр}}} =$$

$$= \frac{46836 + 1,005 \cdot 1180,83 \cdot 274,15}{1,005 \cdot 293,15} = 1263,27 \frac{\text{кг}}{\text{год}}.$$

$$G_B = \frac{1263,27}{1,05} = 1203,1 \frac{\text{кг}}{\text{год}}.$$

Об'єм повітря, яке видаляється із приміщення базової лабораторії:

$$v_B = \frac{G_B}{\gamma} = \frac{1203,1}{1,225} = 982,13 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Отримані значення потужності інфрачервоного обігрівача, об'ємів припливного та витяжного повітря можуть бути вихідними параметрами при розробці автоматизованих систем вентиляції та опалення приміщення лабораторії при забезпеченні в ній температури 18 °C під час проведення занять.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Курсовое и дипломное проектирование гражданских и промышленных зданий / В. П. Титов, Э. В. Сазонов, Ю. С. Краснов, В. И. Новожилов. – М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.
2. Державні будівельні норми України. Будинки і споруди навчальних закладів: ДБН В2.2-3-97. – К.: Держкоммістобудування України, 1997. – 90 с.
3. Технические данные вентиляторов осевых ВО-6-300, ВО-14-320 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oovv.ru/ventilyaciya/tehnicheskie-dannye-ventilyatorov-osevyx.html>.
4. Виды и типы вентиляторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fanner.ru/vidy-ventilyatorov>.
5. Потужність нагрівача [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.informteh.ru/sistemi_ventiljacii/raschot_ventiljacii/.
6. Системы притяжной и вытяжной вентиляции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.clim-art.ru/ventilation/pritochno-vityazhnaya/>.
7. Питома вага, густина повітря [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.about-air.ru/svoystva-vozduha/plotnost-vozduha/plotnost-vozduha-pri-normalnyh-usloviyah.html>.
8. Аэродинамические коэффициенты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bibliotekar.ru/otoplenie-ventilyaciya/75.html>.
9. Державні будівельні норми України. Опалення, вентиляція та кондиціювання: ДБН В2.5-67:2013. – К.: Міністерство регіонів України, 2013. – 149 с.
10. Маренич, О. Л. Экономия электроэнергии при ремонте подвижного состава железных дорог / О. Л. Маренич, О. О. Маренич // Трансбалтика 2009 (28.05-29.05.2009): сборник материалов XII международной конференции. – Рига, 2009.

Висновки

Електричне опалення навчальних лабораторій більш зручне в експлуатації, більш комфортне та вигідніше економічно в порівнянні з водяними системами, в яких тепло отримують шляхом спалення палива в котлах. Розроблена методика дозволяє визначити значення потужності інфрачервоних обігрівачів, об'ємів припливного та витяжного повітря, при яких температура в лабораторії підтримується на рівні 18 °C. Ці значення вказаних параметрів можуть бути використані як вихідні данні для розробки автоматизації системи по підтримці заданої температури в лабораторії при мінімальних відхиленнях. Забезпечення мінімальних відхилень від заданої температури забезпечує економію електроенергії, що важливо не тільки при електроопаленні приміщень, а й при використанні електроенергії в усіх галузях господарства країни [10].

REFERENCES

1. Titov V. P., Sazonov E. V., Krasnov Y. S., Novozhilov V. I. *Cursovoye i diplomnoye proektirovaniye grajdanskikh i promishlennykh zdaniy* [Course and diploma project for civil and industrial buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 208 p.
2. *Derzhavny budivelnny normy Ukrainy. Budinky i sporudy navchalnykh zakladiv: DBN V2.2-3-97*. [State building standards of Ukraine. Buildings and edifices of educational institutions: DBN V2.2-3-97]. Kyiv, State committee of the city building of Ukraine Publ., 1997. 90 p.
3. Tekhnicheskiye danniyе ventilyatorov osevykh VO-6-300, VO-14-320 [Technical information of axial ventilators VO-6-300, VO-14-320]. Available at: <http://www.oovv.ru/ventilyaciya/tehnicheskiye-danniyе-ventilyatorov-osevyx.html>.
4. Vidy i tipy ventilyatorov [Kinds and types of ventilators]. Available at: <http://www.fanner.ru/vidy-ventilyatorov>.
5. Potuzhnist nagrивcha [Capacity of heating apparatus]. Available at: http://www.informteh.ru/sistemi_ventiljacii/raschet_ventiljacii/.
6. Sistemy prityazhnoy i vityazhnoy ventilyacii [Systems of supply and exhaust ventilation]. Available at: <http://www.clim-art.ru/ventilation/pritochno-vityazhnaya/>.
7. Pitoma vaga, hustina povitrya [Specific air weight and density]. Available at: <http://www.about-air.ru/svoystva-vozduha/plotnost-vozduha/plotnost-vozduha-pri-normalnyh-usloviyah.html>.
8. Aerodinamicheskiye koeffitsienty [Aerodynamic coefficients]. Available at: <http://www.bibliotekar.ru/otoplenie-ventilyaciya/75.html>.
9. *Derzhavny budivelnny normy Ukrainy. Opalennya, ventilyaciya ta kondiciyuvannya: DBN B2.5-67:2013*. [State building standards of Ukraine. Heating, ventilation and conditioning: DBN B2.5-67:2013]. Kyiv, Ministry of regions of Ukraine Publ., 2013. 149 p.
10. Marenych O. L., Marenych O. O. *Ekonomiya elektroenerгии pri remonte podvizhnogo sostava zheleznikh dorog* [Energy savings in the repair of railway rolling stock].

Надійшла до друку 19.05.2015.

Sbornik materialov XII mezhdunarodnoy konferentsii «Transbaltika 2009» (28.05-29.05.2009) [Collection of materials of the International Conference «TransBaltika 2009»]. Riga, 2009.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*Зовнішній рецензент *Витанасенко С. І.*

Опалення – важливий фактор забезпечення потрібного мікроклімату в будь-якому приміщенні, в тому числі і в навчальних лабораторіях вищого навчального закладу. Мікроклімат має суттєвий вплив на продуктивність праці студентів, викладачів, лаборантів. Основним фактором мікроклімату є температура в приміщенні. В роботі проведені дослідження для отримання вихідних даних, які потрібні для заміни традиційного водяного опалення в лабораторії на електричне. При цьому повинна підтримуватись задана температура. Обраний спосіб вентиляції приміщення, типи електричних нагрівачів, об'єми припливного та витяжного повітря, при яких температура в лабораторії буде забезпечувати 18°C згідно існуючих вимог. Електричне опалення приміщень більш зручне в експлуатації, більш комфортне та вигідніше економічно в порівнянні з водяними системами, в яких тепло отримують шляхом спалення палива в котлах. Для досягнення поставленої цілі та вирішення завдань складено рівняння теплового балансу приміщення лабораторії, на базі якого виконані необхідні дослідження. У статті пропонується система електроопалення навчальної лабораторії як альтернатива існуючому централізованому водяному опаленню з використанням газу в центральній котельній у холодний та перехідний періоди року. В якості опалювальних пристроїв пропонуються сучасні інфрачервоні обігрівачі. Рівняння теплового балансу складено з урахуванням параметрів реальної навчальної лабораторії. Пропонується обладнувати лабораторію механічною припливно-витяжною системою вентиляції. Науковою новизною є запропонований метод визначення об'єму (ваги) припливного та витяжного повітря для забезпечення заданої температури в приміщенні навчальної лабораторії із використанням електричних нагрівачів. Практичне значення полягає у тому, що застосування електричного опалення дозволяє покращити мікроклімат в лабораторії, експлуатаційні витрати. Проведені дослідження дозволяють визначити вихідні параметри для автоматизації системи електричного опалення лабораторії з метою підтримання заданої температури. Рекомендується електричне опалення як альтернатива радіаторно-водяному.

Ключові слова: електроопалення навчальної лабораторії; рівняння теплового балансу приміщення; система вентиляції; потужність інфрачервоного обігрівача; переваги електричного опалення.

УДК 697.27 : 727 : 378.4

О. Л. МАРЕНИЧ, К. С. СЕМЕНЮК (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, 49010, г. Днепропетровск, Украина, ул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47, эл. почта: oksana.marenich17@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-3602-5851

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ОБОГРЕВ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ВЫСШЕГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ

Отопление – важный фактор обеспечения нужного микроклимата в любом помещении, в том числе и в учебных лабораториях ВУЗа. Микроклимат оказывает существенное влияние на производительность труда студентов, преподавателей, лаборантов. Основным фактором микроклимата является температура в помещении. В работе проведены исследования для получения исходных данных, необходимых для замены традиционного водяного отопления в лаборатории на электрическое. При этом должна поддерживаться заданная температура. Избранный способ вентиляции помещения, тип электрических нагревателей, объемы приточного и вытяжного воздуха, при которых температура в лаборатории согласно существующим требованиям будет обеспечивать 18°C. Электрическое отопление помещений более удобное в эксплуатации, более комфортное и выгоднее экономически по сравнению с водяными системами, в которых тепло получают путем сжигания топлива в котлах. Для достижения поставленной цели и решения задач составлено уравнение теплового баланса помещения лаборатории, на базе которого выполнены необходимые исследования. В статье предлагается система электроотопления учебной лаборатории, как альтернатива существующему централизованному водяному отоплению с использованием газа в центральной котельной в холодный и переходный периоды года. В качестве отопительных устройств предлагаются современные инфракрасные обогреватели. Уравнение теплового баланса составлено с учетом параметров реальной учебной лаборатории. Предлагается оборудовать лабораторию механической приточно-вытяжной системой вентиляции. Научной новизной является предложенный метод определения объема (веса) приточного и вытяжного воздуха для обеспечения заданной температуры в помещении учебной лаборатории с применением электрических обогревателей. Практическое значение состоит в том, что применение электрического отопления позволяет улучшить микроклимат в лаборатории, эксплуатационные расходы. Проведенные исследования позволяют определить выходные параметры для автоматизации системы электрического отопления лаборатории с целью поддержания заданной температуры. Рекомендуется электрическое отопление как альтернатива радиаторно-водяному.

Ключевые слова: электроотопления учебной лаборатории; уравнение теплового баланса помещения; система вентиляции; мощность инфракрасного обогревателя; преимущества электрического отопления.

Внутренний рецензент *Костін М. О.*Внешний рецензент *Витанасенко С.И.*

© Маренич О. Л., Семенюк К. С., 2015

UDC 697.27 : 727 : 378.4

O. L. MARENYCH, K. S. SEMENIUK (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 373-15-47, e-mail: oksana.marenich17@mail.ru,
ORCID: orcid.org/0000-0003-3602-5851

ALTERNATIVE HEATING LABORATORIES THE HIGHER EDUCATION INSTITUTION

Heating is an important factor in ensuring the right microclimate in any room, including educational laboratories university. Microclimate has a significant impact on the productivity of students, teachers and technicians. The main factor is the microclimate temperature in the room. This paper studies to obtain baseline data required to replace traditional water heating in the laboratory for electric. This should be supported by a given temperature. The method of ventilation facilities, types of electric heaters, volume of incoming and exhaust air, at which temperature the laboratory will S according to your requirements. provide 18 Electric space heating is more convenient to use, more comfortable and cheaper cost compared to the water systems in which heat is produced by burning fuel in boilers. To achieve goals and meet the challenges of the heat balance equation composed laboratory facilities, to which fulfilled the necessary research. The article offers educational laboratory electric system as an alternative to the existing centralized water heating using gas in the central boiler house in the cold and transitional seasons. As heating devices offers modern infrared heaters. Heat balance equation takes into account the parameters of a real educational laboratory. It is proposed to equip a laboratory mechanical supply and exhaust ventilation system. Scientific novelty of the proposed method of determining the amount (weight) of the supply and exhaust air for a given temperature in the laboratory study using electric heaters. The practical significance lies in the fact that the use of electric heating allows to improve the microclimate in the laboratory operating costs. Past studies can determine the initial parameters for automation of electric heating systems laboratories in order to maintain the desired temperature. It is recommended as an alternative to electric heating radiator-water.

Keywords: electric academic laboratories; the heat balance equation facilities; ventilation; power infrared heater; electric heating benefits.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Vypanasenko S.I.*

О. О. МАТУСЕВИЧ, Д. В. МІРОНОВ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056)793 19 17, ел. пошта: al_m0452@meta.ua, mironov.epz@yandex.ua,
ORCID: orcid.org/0000-0002-2174-7774, orcid.org/0000-0002-5717-4322

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РИЗИК-АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ МЕРЕЖ

Вступ

Процес функціонування існуючої системи ТО і Р - це сукупність взаємопов'язаних організаційних, управлінських, технічних і технологічних процесів. Вона включає в себе моніторинг стану обладнання, аналіз отриманих результатів, своєчасне проведення ремонтів з частковим або повним відновленням ресурсу обладнання при прийнятному рівні матеріальних і фінансових витрат. Інтенсивний розвиток як залізничної галузі в цілому, так і її електроенергетичного сектора, зокрема, на даний момент показує зниження ефективності використовуваної системи планово-попереджувальних ремонтів обладнання, яка лежить в основі системи ТО і Р. Разом з тим, спостерігається істотний вплив ризиків на діяльність підприємств залізничної галузі, а практичних рекомендацій і науково обґрунтованих методів управління ризиками явно недостатньо. У зв'язку з цим дослідження природи ризику на транспорті, класифікація факторів, що впливають на рівень ризиків, оцінка економічних наслідків їх виникнення, розробка методик аналізу та прогнозування ризиків, методів управління та мінімізації наслідків ризиків є досить важливими питаннями.

Мета

Розробка методики оцінки ризиків відмов основного електрообладнання тягових підстанцій для підвищення якості технічного обслуговування.

Результати дослідження

Розвиток залізничної галузі, формування нових структур і впровадження ризик-менеджменту стає актуальним для підприємств електрифікованих залізниць України при супроводі їх діяльності. Інтерес до управління ризиками з боку керівництва підприємств обумовлений необхідністю посилення контролю над незапланованими матеріальними і фінансовими витратами при експлуатації обладнання, а також зниженням збитку від виходу його з ла-

ду. Управління ризиками має на увазі ретельний аналіз умов для прийняття рішень. Управління ризиками - це логічний і систематичний процес, який можна застосовувати для вибору методів подальшого вдосконалення діяльності, підвищення ефективності функціонування системи ТО і Р.

Головним принципом побудови системи ризик-менеджменту є комплексний облік ризику при прийнятті рішень в рамках як планування, так і оцінки результатів діяльності підрозділів тягових мереж. Реалізація системи ризик-менеджменту передбачає [1, 2]:

- організацію ризик-менеджменту (формування спеціальних функцій і процедур в управлінні процесами підприємства та забезпечення їх виконання);
 - формування необхідного методологічного забезпечення діяльності з управління ризиками;
 - розробку інформаційно-аналітичних систем ризик-менеджменту і їх практичну реалізацію.
- Система управління ризиками повинна ґрунтуватися на наступних принципах:
- цілеспрямоване постійне усвідомлення і відстеження ризиків;
 - оцінка ймовірності та наслідків виникнення тієї чи іншої несприятливої ситуації;
 - формування і постійне оновлення інструментарію управління ризиками;
 - встановлення лімітів ризику (максимально точне визначення меж шкоди);
 - розробка рекомендацій щодо формування стратегії і ефективного розподілу ресурсів з урахуванням ступеня ризику;
 - повнота і своєчасність відображення величин ризиків у системах управлінської інформації (інформаційних системах).

В основу процесу аудиту та управління ризиками експлуатації обладнання тягових мереж в своїй базі покладена якісна і вартісна ідентифікація ризик-індикаторів. Ризик, який може застосовуватися для використання в питаннях забезпечення безпеки руху поїздів у господарстві Е в понятійному трактуванні ризик-менеджменту може мати властивості операційного ризику.

© Матусевич О. О., Міронов Д. В., 2015

Операційний ризик – ризик прямих і непрямих втрат, пов'язаних з організацією внутрішньої роботи компанії і спричинених недоліками систем внутрішнього контролю та корпоративного управління, недосконалістю бізнес-процесів та іншими несприятливими подіями нефінансової природи [3-5].

Діагностика ризиків являє собою аналіз бізнес-процесів [6] підприємства з метою виявлення факторів ризику і реалізується в ході ризик-аудиту підприємства, що представляє собою комплексний аналіз параметрів і ділянок діяльності підприємства з метою ідентифікації, опису та класифікації ризиків. Найбільш поширений метод при діагностиці ризиків заснований на статистичних спостереженнях, які є найбільш об'єктивними і точними, але часто важко реалізованими, в першу чергу, внаслідок труднощів формалізації історичних даних і надання їм аналітично прийнятної форми, а часто через відсутність необхідної історичної вибірки [7-9]. Виявлення ризиків є пріоритетним етапом, фундаментом побудови системи управління ризиками. На ньому ґрунтуються всі інші процедури ризик-менеджменту, так як, зрештою, якісна діагностика визначає успішність управління ризиками та рівень ефективного корпоративного управління в цілому.

Процес управління ризиками на підприємстві можна представити у вигляді структурної схеми (рис. 1).

Розглянемо структурну схему процесу управління ризиками.

Взаємодія та консультування. На кожному етапі процесу управління ризиками необхідно проводити обмін інформацією з внутрішніми і зовнішніми учасниками цього процесу.

Визначення контексту ризик-менеджменту. Визначаються зовнішні та внутрішні параметри функціонування організації та процесу ризик-менеджменту. Також необхідно визначити вимоги за критеріями оцінки ризиків, їх структури і методів аналізу.

Ідентифікація ризиків. На даному етапі відбувається конкретизація ризикової ситуації по відношенню до досягнення поставленої мети.

Аналіз ризиків. Визначається рівень ризику через ймовірність виникнення ризику і наслідки ризикової ситуації. Виявляються причини і фактори виникнення ризику, масштаби наслідків, конкретизуються і оцінюються моделі і методи контролю ризиків.

Оцінка ризиків. На даному етапі відбувається порівняння рівня ризику з встановленими критеріями. Визначається баланс між потенційною вигодою і негативними наслідками ризикової ситуації. Проводиться оцінка масштабу керуючого впливу на ризик і характеристики цього впливу.

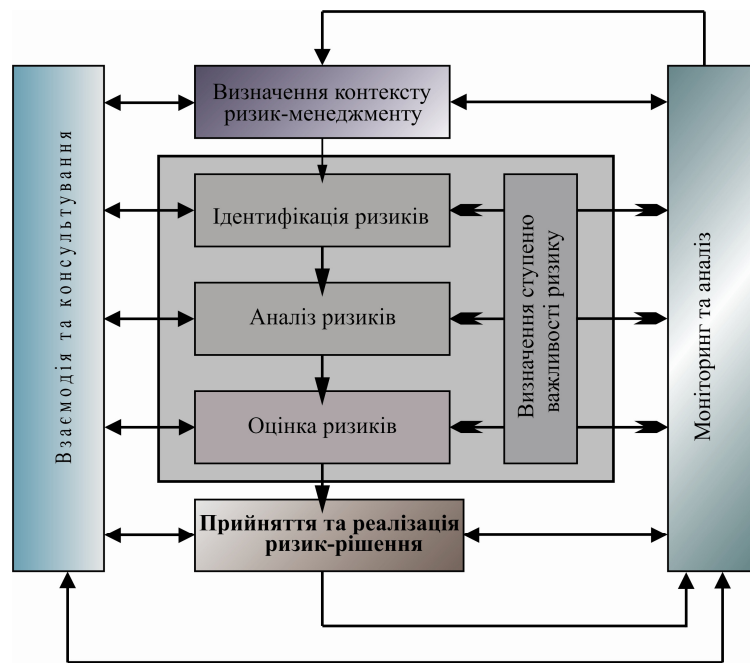


Рис. 1. Структурна схема процесу управління ризиками

Прийняття та реалізація ризикового рішення. Здійснюється розробка та впровадження керуючих впливів, мета яких – збільшення поте-

нційних вигод і зниження потенційних витрат відносно ризикових ситуацій.

Моніторинг та аналіз. Відстеження та аналіз ефективності процесу управління ризиками. Проводиться на кожній стадії процесу управління.

Враховуючи вищевизначене, на початковому етапі проведення ризик-аналізу здійснимо моніторинг поточного стану обладнання тягових мереж з оцінкою кількості відмов облад-

нання у вигляді помісячних значень кількості відмов. Для цього проаналізуємо відмови основного силового обладнання ТП електрифікованих залізниць України за період 2010 - 2013 рр. на підставі аналізу роботи господарства електрифікації та електропостачання [10]. Результати моніторингу поточного стану обладнання тягових мереж наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Помісячні показники відмов обладнання тягових мереж за 2010 – 2013 рр.

№ виміру	Період спостережень	Кількість відмов, Квідм	№ виміру	Період спостережень	Кількість відмов, Квідм
1	січень 2010	8	25	січень 2012	8
2	лютий 2010	4	26	лютий 2012	3
3	березень 2010	1	27	березень 2012	2
4	квітень 2010	4	28	квітень 2012	2
5	травень 2010	3	29	травень 2012	4
6	червень 2010	5	30	червень 2012	4
7	липень 2010	5	31	липень 2012	2
8	серпень 2010	2	32	серпень 2012	1
9	вересень 2010	3	33	вересень 2012	9
10	жовтень 2010	3	34	жовтень 2012	6
11	листопад 2010	5	35	листопад 2012	1
12	грудень 2010	7	36	грудень 2012	13
13	січень 2011	7	37	січень 2013	8
14	лютий 2011	3	38	лютий 2013	4
15	березень 2011	3	39	березень 2013	5
16	квітень 2011	6	40	квітень 2013	1
17	травень 2011	2	41	травень 2013	5
18	червень 2011	5	42	червень 2013	7
19	липень 2011	6	43	липень 2013	7
20	серпень 2011	2	44	серпень 2013	5
21	вересень 2011	4	45	вересень 2013	8
22	жовтень 2011	5	46	жовтень 2013	1
23	листопад 2011	11	47	листопад 2013	5
24	грудень 2011	4	48	грудень 2013	10

Наступним кроком ризик-аналізу є проведення статистичної оцінки помісячних відмов електрообладнання і побудова щільності ймовірності даного показника.

Основні значення статистичних оцінок ряду помісячних показників відмов обладнання тягових мереж по господарству електрифікації та

електропостачання за чотири роки (з 2010 по 2013 рр.): характеристики розподілу випадкової величини - медіани (M_e), модального значення (M_{mod}), стандартного відхилення (δ) та інших, представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Статистична оцінка відмов обладнання тягових мереж

Кількість вимірів	Кількість відмов	Середнє значення	Медіана (M_e)	Мода (M_{mod})	Мін	Макс	δ
48	229	4,8	4,5	5,0	1,0	13,0	0,125

На рис. 2 наведена щільність ймовірності відмов обладнання тягових мереж. По осі абсцис показана кількісна оцінка відмов, по осі орди-

нат - ймовірнісна оцінка цього показника, виражена в кількості подій, що відбулися в мі-

сяць. На стовпцях гістограм – процентна вірогідність числового значення показника.

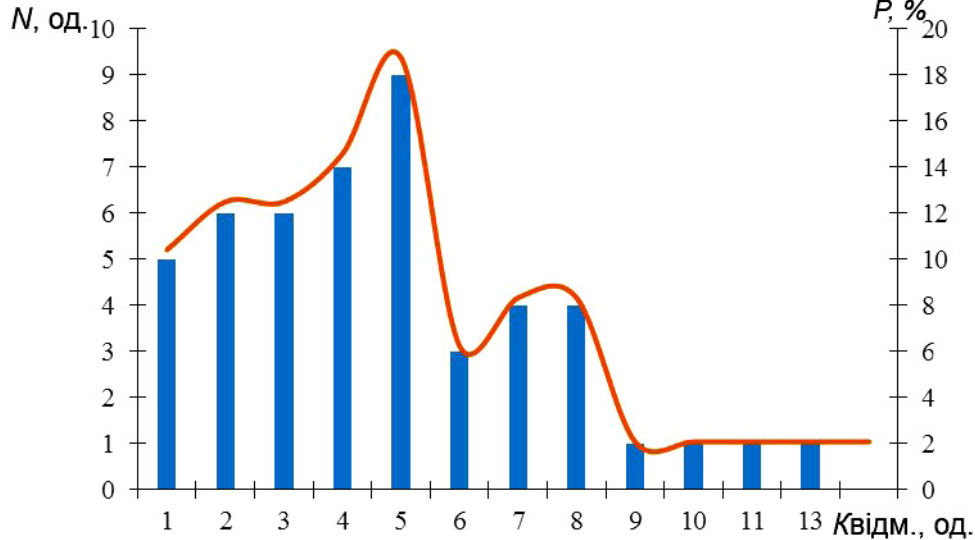


Рис. 2. Щільність ймовірності відмов обладнання тягових мереж:

N – кількість подій, $K_{відм}$ – кількість відмов обладнання, P – ймовірність виникнення відмови

На наступному етапі проведемо оцінку найбільшої ймовірності шляхом виявлення модального значення виникнення відмов:

$$P_{відмi} = f(\text{mod}[K_{відмi}(t)]). \quad (1)$$

Оцінку найбільшої ймовірності доцільно отримувати на підставі побудованої щільності ймовірності розподілу відмов (див. табл. 2, рис. 2). Для даного показника при загальній кількості спостережень 48 і найбільшій кількості подій з теоретичного закону розподілу 9 (рис. 2) найбільша ймовірність складе:

$$P = 9 / 48 = 0,19. \quad (2)$$

У роботі, згідно теоретичним положенням ризик-аналізу, кількісно значення ризику R визначається на підставі базового співвідношення теорії управління ризиками, де P – ймовірність виникнення порушення нормальної роботи обладнання ТП; S – кількісний показник збитку від порушень роботи обладнання ТП. На наступному етапі проведемо оцінку найбільш ймовірних ризиків R_n відмов, яка визначається як добуток значення модальної ймовірності та модального значення даного показника, тобто:

$$R_{відмi n} = P_{відмi} \cdot \text{mod}[K_{відмi}(t)]. \quad (3)$$

Одиниця виміру ризиків збігається з одиницею виміру даного показника. Модальне значення показника визначається на підставі побудованої щільності ймовірності розподілу відмов обладнання (див. табл. 2, рис. 2). Для показника «кількість відмов обладнання» $\text{mod}(K_{відм}) = 5$. Звідси найбільш ймовірний ри-

зик для показника R_n «кількість відмов обладнання»:

$$R_{відмн} = 0,19 \cdot 5 = 0,94 \text{ од.} \quad (4)$$

Наступний етап передбачає побудову нормативно-допустимих 90 % верхніх $R_{дв}$ і нижніх $R_{дн}$ меж діапазону ризику на підставі визначення волатильності ризиків (середнє квадратичне відхилення) σR . Обчислення меж проводиться за допомогою виразу:

$$R_{дв} = R_n + k \cdot \sigma R; R_{дн} = R_n - k \cdot \sigma R, \quad (5)$$

де σR – стандартне відхилення (волатильність) нормального розподілу ризику відмов обладнання, k – коефіцієнт для відповідного рівня довірчої ймовірності.

Для значної кількості симетричних розподілів при довірчій ймовірності 90 % коефіцієнт $k = 1,6$. Найбільш відповідальним є обчислення верхньої межі ризиків, перевищення якої поточним значенням ризику буде свідчити про несприятливий стан якості утримання обладнання тягових мереж. В якості нижньої межі $R_{дн}$ рекомендовано використовувати значення $k = 0,5 \div 1$. Довірча ймовірність при цьому скорочується до 80 ÷ 85%; однак, відповідно до закону Парето, це достатньо для ідентифікації основної кількості подій, порушень і може використовуватися на практиці.

Наступним етапом є побудова карти ризиків. Карта ризиків є кінцевим аналітичним продуктом етапу діагностики ризиків і являє собою графічно впорядковане відображення факторів або об'єктів ризику відповідно до величини і ймовірності можливого збитку підприємству.

Карта ризиків має вигляд двовірної діаграми. По осі абсцис розташовується вартісне вираження оціненого збитку під впливом розглянутого фактора, а по осі ординат - ймовірності реалізації відповідної події. Найбільш поширеним видом карти ризиків є її побудова за факторами ризику. Побудуємо карту ризиків шляхом визначення найбільш вірогідної (модальної) кривої ризику виходячи з виразу

$R_H = P_H \cdot S_H = const$ при варіації значень P і S . Той же метод використаємо для побудови нормативно допустимих верхніх $R_{дв}$ і нижніх $R_{дн}$ кривих меж діапазону ризику. У карті ризиків по осі абсцис відкладаються значення $K_{відм.}$, а по осі ординат – ймовірність появи відмови. На рис. 3 наведено карту ризиків відмов обладнання тягових мереж.

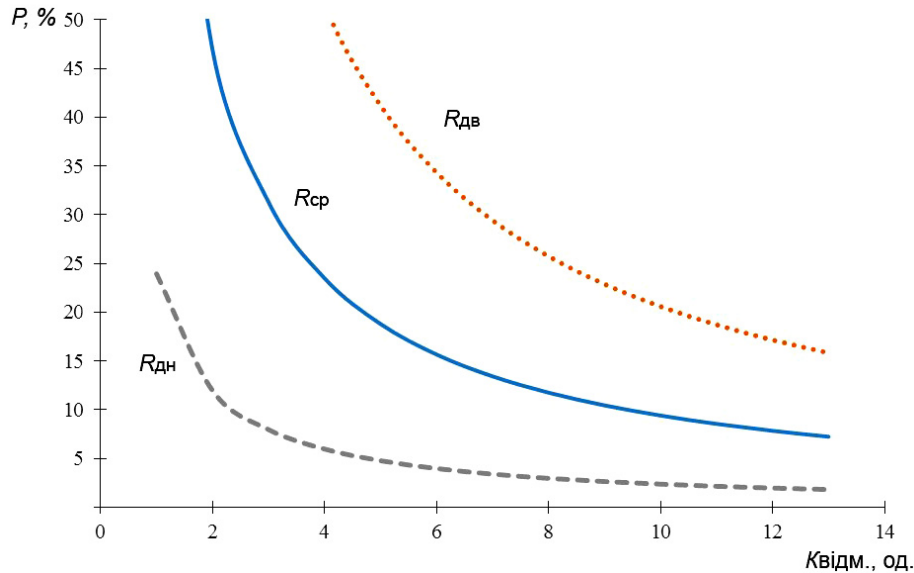


Рис. 3. Карта ризиків

За побудовою карти ризиків проводиться оперативний моніторинг ризиків відмов обладнання $R(t)$ та їх розміщення на карті ризиків. На цьому ж етапі здійснюється вибір або коригування значень цільових показників ризиків $R_{ц.}$

обраних в рамках діапазону $R_{дн} \leq R_{ц.} \leq R_{дв}$. Прийmemo для ризиків виникнення відмов $R_{ц.} = R_{сп.}$

Зобразимо ризики відмов обладнання для періоду 2010 – 2011 рр. на карті ризиків (рис. 4) та проведемо аналіз отриманих результатів.

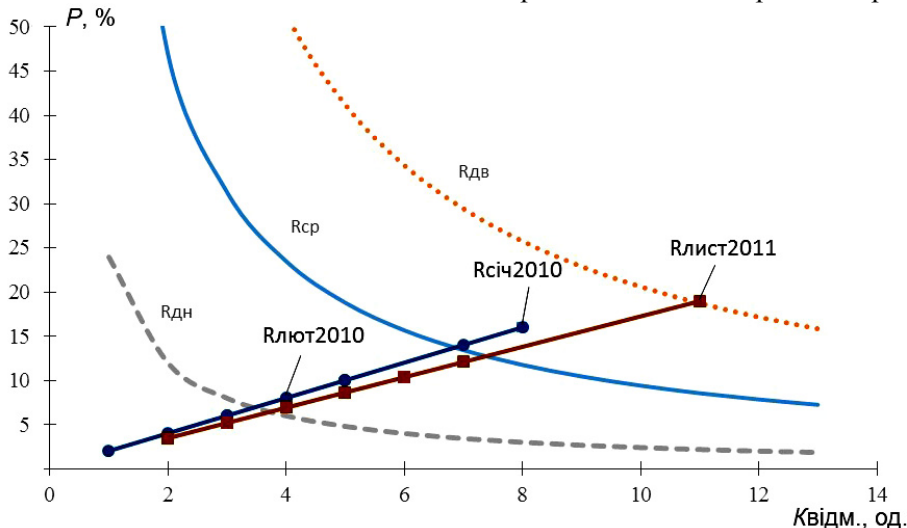


Рис. 4. Карта ризиків відмов обладнання з відображенням поточних ризиків відмов за 2010 – 2011 рр.

Для оцінки поточних ризиків візьмемо значення ризику відмов для січня, лютого 2010 р. та листопада 2011 р. З отриманої карти ризиків бачимо, що $R_{січ2010} > R_{ц.}$, $R_{лист2011} > R_{ц.}$ (при цьому $R_{лист2011}$ перевищує навіть верхню но-

рмативно-допустиму 90 % межу ризику). Згідно з положеннями моделі ризик-аналізу [11] при перевищенні поточними $R(t)$ цільових показників $R_{ц.}$ необхідно провести заходи щодо виявлення причин відхилення з подальшим їх

© Матусевич О. О., Міронов Д. В., 2015

усуненням або зменшенням впливу на устаткування. При проведенні поточного моніторингу ризиків додатково необхідно розробити рекомендації по управлінню якістю утримання обладнання, яке відмовило, на підставі обслуговування та ремонту за поточним станом.

Значення $R_{\text{лют2010}}$ менше $R_{\text{ц}}$, тобто знаходяться в допустимому діапазоні. Це означає, що причини відмови обладнання не є критичними, проте їх слід взяти до уваги. При проведенні поточного моніторингу ризиків в цьому разі додатково приймається рішення про управління станом обладнання на підставі штатних планово-попереджувальних заходів з утримання та ремонту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Barati S., Mohammadi S. Enhancing Risk Management with an efficient risk identification approach. Proc. of the 4th IEEE International Conference «Management of Innovation and Technology (21-24 Sept. 2008)». Bangkok, Thailand, 2008, pp. 1181-1186.
2. Perera J., Holsomback J. An integrated risk management tool and process. Proc. of the IEEE Aerospace Conference (5-12 March 2005). Big Sky, Montana, 2005, pp. 129-136.
3. Алехин, Е.И. Теория риска и моделирование рискованных ситуаций / Е.И. Алехин. - Орел : Издательство ОГУ, 2008. — 152 с.
4. Эскиндаров, М.А. Прогнозирование и анализ рисков в деятельности хозяйствующих субъектов : монография / М. А. Эскиндаров. — М. : ФА, 2003. — 397 с.
5. Тарасов, Е. М. Основные подходы к оценке рисков вложения инвестиций в систему организации железнодорожного транспорта / Е.М. Тарасов. — Самара : СНЦ РАН, 2010. — 124 с.
6. ГОСТ Р ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Требования. — Введ. 2001-08-15. — М. : Изд-во стандартов, 2001. — 17 с.
7. Шехватов, Д. Эволюция систем управления техобслуживанием и ремонтами / Д. Шехватов // Оборудование. — 2004. — №2. — С. 18 – 24.
8. Коваль, В.А. Підвищення надійності експлуатації ковзних електричних контактів міського електротранспорту: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Коваль Віталій Анатолійович; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад.В. Лазаряна. — Д., 2013. — 179 с.
9. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. — СПб. : Политехника, 2000. — 248 с.

© Матусевич О. О., Міронов Д. В., 2015

Висновок

В результаті проведених досліджень розроблено методику проведення ризик-аналізу оцінки технічного стану обладнання тягових підстанцій. Описано основні положення теорії ризиків та шляхи її застосування стосовно системи технічного обслуговування і ремонту електроустаткування.

Запропонована методика ризик-аналізу стану обладнання тягових мереж спрямована на оцінку рівня якості його обслуговування і прийняття стратегії обслуговування при зіставленні поточних і цільових показників ризиків порушень та їх наслідків.

Аналіз ризиків експлуатації обладнання дозволяє оцінити ефективність і контроль реалізації управлінських рішень, спрямованих на вдосконалення правил експлуатації, системи технічного обслуговування та ремонту обладнання тягових мереж електрифікованих залізниць.

REFERENCES

1. Barati S., Mohammadi S. Enhancing Risk Management with an efficient risk identification approach. Proc. of the 4th IEEE International Conference «Management of Innovation and Technology (21-24 Sept. 2008)». Bangkok, Thailand, 2008, pp. 1181-1186.
2. Perera J., Holsomback J. An integrated risk management tool and process. Proc. of the IEEE Aerospace Conference (5-12 March 2005). Big Sky, Montana, 2005, pp. 129-136.
3. Alekhin E.I. *Teoriya riska i modelirovanie riskovykh situatsiy* [Risk theory and modeling of risk situations]. Orel, OSU Publ., 2008. 152 p.
4. Eskindarov M.A. *Prognostirovanie i analiz riskov v deyatel'nosti khozyaystvuyushchikh sub"ektiv* [Forecasting and risk analysis of business entities]. Moscow, FA Publ., 2003. 397 p.
5. Tarasov E. M. *Osnovnye podkhody k otsenke riskov vlozheniya investitsiy v sistemu organizatsii zheleznodorozhnogo transporta* [The main approaches to risk assessment of investments in the organization of railway transport]. Samara, SSC of RAS Publ., 2010. 124 p.
6. GOST R ISO 9001-2001. *Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya*. [State Standard ISO 9001-2001. Quality management system. Demands]. Moscow, Standartinform Publ., 2001. 17 p.
7. Shekhvatov D. Evolyutsiya sistem upravleniya tekhnobsluzhivaniem i remontami [The evolution of control systems maintenance and repairs]. *Oborudovanie – Equipment*, 2004, no. 2, pp. 18-24.
8. Koval' V.A. *Pidvyshchennya nadiynosti ekspluatatsiyi kovznykh elektrychnykh kontaktiv mis'koho elektrotransportu* Kand, Diss. [Improving the reliability of sliding electrical contacts municipal electric. Kand. Diss.]. Dnipropetrovsk, 2013. 179 p.
9. Ryabinin I. A. *Nadezhnost' i bezopasnost'*

10. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2010-2013 рр. [Текст] / Головне управління електрифікації та електропостачання. – К. : ТОВ ВД «Мануфактура», 2013. – 245 с.

11. Матусевич, О.О. Математична модель ризик-аналізу технічного стану силового обладнання тягових підстанцій / О.О. Матусевич, Д.В. Міронов // Гірничо електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Д., 2014. – Вип. 93. – С. 41-47.

Надійшла до друку 19.05.2015.

strukturno-slozhnykh system [Reliability and safety of structural complex systems]. Saint Petersburg, Politehnika Publ., 2000. 248 p.

10. *Analiz roboty hospodarstva elektryfikatsiyi ta elektropostachannya v 2010-2013 rotsi* [Analysis of the work management electrification and power supply in 2010-2013]. Kyiv, Manufaktura Publ., 2013. 245 p.

11. Matusievych O.O., Mironov D.V. Matematychna model' ryzyk-analizu tekhnichnoho stanu sylovoho obladnannya tyahovykh pidstantsiy [Mathematical model of risk-analysis the technical condition of the power equipment of traction substations]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka – Mining electrical engineering and automation*, 2014, vol. 93, pp. 41-47.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Випанасенко С.І.*

Розробка нових стратегій оцінки технічного стану обладнання тягових мереж для підвищення його надійності. Для вирішення поставленого завдання були використані основні положення теорії ризиків. Оцінка ризику експлуатації обладнання здійснювалася в результаті аналізу відмов устаткування тягових підстанцій. Внаслідок проведених досліджень була запропонована методика ризик-аналізу стану обладнання тягових мереж, яка формалізує процедуру технічного обслуговування в залежності від співвідношення обчислюваних і цільових (планових) рівнів ризику. Розглянуто основні положення теорії ризиків, принципи побудови і функціонування системи ризик-менеджменту. Показана актуальність формування на підприємствах енергетичної галузі залізничного транспорту системи внутрішнього контролю та управління ризиками експлуатації обладнання. Запропоновано процес управління ризиками та методика підвищення якості обслуговування обладнання тягових мереж, застосовані більш досконалі методи аналізу відмов електрообладнання. Формування на підприємствах електрифікованих залізниць України системи управління ризиками дозволить підвищити ефективність реалізації і поліпшити контроль управлінських рішень, спрямованих на вдосконалення правил експлуатації, системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) обладнання і забезпечить попередження виникнення та зниження важкості можливих наслідків.

Ключові слова: електропостачання; електрифіковані залізниці; тягова підстанція; обладнання; технічне обслуговування; ремонт; діагностування; технічний стан; теорія ризиків; ризик-аналіз.

УДК 621.331 : 621.311.4

А. А. МАТУСЕВИЧ, Д. В. МИРОНОВ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056)793 19 17, эл. почта: al_m0452@meta.ua, mironov.epz@yandex.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-2174-7774, orcid.org/0000-0002-5717-4322

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РИСК-АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ

Разработка новых стратегий оценки технического состояния оборудования тяговых сетей для повышения его надежности. Для решения поставленной задачи были использованы основные положения теории рисков. Оценка риска эксплуатации оборудования осуществлялась в результате анализа отказов оборудования тяговых подстанций. Вследствие проведенных исследований была предложена методика риск-анализа состояния оборудования тяговых сетей, которая формализует процедуру технического обслуживания в зависимости от соотношения вычисленных и целевых (плановых) уровней риска. Рассмотрены основные положения теории рисков, принципы построения и функционирования системы риск-менеджмента. Показана актуальность формирования на предприятиях энергетической отрасли железнодорожного транспорта системы внутреннего контроля и управления рисками эксплуатации оборудования. Предложено процесс управления рисками и методика повышения качества обслуживания оборудования тяговых сетей, применены более совершенные методы анализа отказов электрооборудования. Формирование на предприятиях электрифицированных железных дорог Украины системы управления рисками позволит повысить эффективность реализации и улучшить контроль управленческих решений, направленных на совершенствование правил эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) оборудования и обеспечит предупреждение возникновения и снижения тяжести возможных последствий.

Ключевые слова: электроснабжение; электрифицированные железные дороги; тяговая подстанция; оборудование; техническое обслуживание; ремонт; диагностирование; техническое состояние; теория рисков; риск-анализ.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Випанасенко С.И.*

© Матусевич О. О., Міронов Д. В., 2015

UDC 621.331 : 621.311.4

O. O. MATUSEVYCH, D. V. MIRONOV (DNURT)

Department of Power Supply, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine,
tel.: +38 (056)793 19 17, e-mail: al_m0452@meta.ua, mirosov.epz@yandex.ua,
ORCID: orcid.org/0000-0002-2174-7774, orcid.org/0000-0002-5717-4322

METHODOLOGY OF RISK ANALYSIS THE TECHNICAL CONDITION OF TRACTION NETWORKS EQUIPMENT

The development of new strategies to evaluate the technical condition of the equipment traction networks to improve its reliability. To solve this problem have been used basic tenets of the theory of risk. The risk assessment was carried out operation of the equipment as a result of equipment failure analysis of traction substations. As a consequence of the research proposed a method for risk analysis of equipment traction networks, which formalizes the process of maintenance, depending on the ratio of the calculated and target (planned) risk levels. The basic tenets of the theory of risk, principles of construction and operation of the risk management system. The urgency of the formation of the enterprises of the energy sector of railway transport system of internal control and risk management of the equipment. Suggested risk management process and methodology to improve the quality of service equipment traction networks, applied improved methods for analyzing electrical failures. Formation of the enterprises of Ukraine electrified railways risk management systems will improve the efficiency of implementation and to improve the control of management decisions aimed at improving the rules of operation, system maintenance and repair equipment and provide warning of occurrence and reduce the severity of the possible consequences.

Keywords: electricity; electrical railways; traction substation equipment; maintenance; repair; diagnostics; technical condition; the theory of risk; risk analysis.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Vypanasenko S.I.*

Ю. Л. САЕНКО (ГВУЗ «ПГТУ»), Д. Н. КАЛЮЖНЫЙ (ХНУГХ)

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская 7, г. Мариуполь, Украина, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, кафедра электро-снабжения городов, Украина, 61002, г. Харьков, ул. Революции, 12, тел.: (050) 560-68-35, эл. почта: KalyuzhnyiDN@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-7374-0734

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ВКЛАДОВ В ПОНИЖЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

Постановка проблемы

Потребление и передача электрической энергии (ЭЭ) пониженного качества приводит к значительным экономическим ущербам [1], вызванных сбоями работы и повреждением оборудования, расстройством технологических процессов, браком продукции, дополнительными потерями мощности и т. п. [1-3]. Рассматривая современный уровень отраслей экономики, видим, что наиболее подвержены таким негативным последствиям: банковский сектор, информационная сфера, высокотехнологические отрасли производства и др. Так, по данным, опубликованным в [4], финансовые потери некоторых потребителей могут достигать 6 000 000 евро/час за одно событие понижения КЭ. Если рассматривать ежегодные убытки, то по данным [2] для отдельных стран, они составляют порядка 10-20 млрд дол. США. Очевидно, что при возникновении вопроса о компенсации экономических убытков возникает задача определения виновников понижения качества ЭЭ (КЭ) и распределения между ними финансовой компенсации ущерба потерпевшей стороне. Эта задача решается на основе определения фактического (долевого) вклада (ФВ) присоединений в понижение КЭ в точке общего присоединения (ТОП), под которым понимается истинное значение доли показателя качества электроэнергии (ПКЭ), вносимой каждой из сторон на границе раздела, в процессе потребления ЭЭ [5].

Анализ последних исследований и публикаций

Первые публикации по данной проблематике появились после вступления в силу государственного стандарта по КЭ ГОСТ 13109-87. Началу дискуссий и толчком к дальнейшему развитию методов определения ФВ в понижение КЭ присоединений в ТОП послужил метод включения/отключения потребителя, разработанный во

ВНИИЭ под руководством Ю. С. Железко [6]. Принципиально другой подход решения рассматриваемой задачи, который известен под методом баланса вторичных мощностей, был предложен Ф. А. Зыкиным [7]. Его идея использования элементов метода симметричных составляющих и теории линейных цепей с источниками несинусоидального тока была использована другими авторами. В результате наиболее обобщенным методом определения ФВ можно считать метод, предложенный В. Я. Майером и Зения [8]. Следующим принципиальным этапом в развитии методов определения ФВ является работа Yang Hong Geng [5, 9]. Ее отличительной особенностью является использование нескольких следующих друг за другом измерений параметров режима работы сети для определения ФВ. Устранению недостатков последнего метода посвящены работы С. И. Гамазина, в которых для определения ФВ предлагается прибегать к использованию активного эксперимента [9, 10]. Последние исследования данной проблематики проведены Г. А. Сендеровичем, который предлагает определять ФВ по проводимостям искажений [11].

Кроме указанных выше авторов, значительный вклад в решение рассматриваемой проблематики внесли такие ученые как О. Г. Гриб, И. И. Карташев, С. С. Смирнов, Л. И. Коверникова, В. Н. Тульский, В. А. Петрович, Е. И. Васильев, Д. М. Подольский, П. Г. Щербакова и др.

Цель статьи

Провести анализ, классифицировать и определить область использования существующих методов определения ФВ присоединений в понижение КЭ в ТОП по несимметрии и несинусоидальности напряжений.

Основные материалы исследования

Все существующие методы определения ФВ в понижение КЭ направлены на решение этой

© Саенко Ю. Л., Калюжный Д. Н., 2015

задачи относительно ТОП, в которой предполагается измерение ПКЭ и параметров режима работы сети отходящих присоединений. Такие условия задачи предопределили классификацию данных методов, которые можно разделить на четыре большие группы (табл. 1). Первая группа методов характеризуется использованием для определения ФВ непосредственно самих ПКЭ. Вторая, третья и четвертая группы используют либо непосредственно токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей, а так же их высших гармонических составляющих, либо соотношения между ними.

Таблица 1

Классификация методов определения ФВ

Группа методов	Величина, используемая для определения ФВ
I	ПКЭ
II	Мощность искажений
III	Напряжения искажений
IV	Проводимости искажений

Рассмотрим методы каждой группы с учетом возможностей их технической реализации

в соответствии с методикой измерений ПКЭ (табл. 2) и использованием дополнительной информации.

Метод включения/отключения потребителя

Согласно данному методу [6] ФВ потребителя (ΦB_{Π}) в понижение КЭ определяется как разность значений ПКЭ при включенном ($ПКЭ_B$) и отключенном ($ПКЭ_O$) его состояниях относительно ТОП:

$$\Phi B_{\Pi} = ПКЭ_B - ПКЭ_O.$$

Очевидно, что этот метод оценивает ПКЭ в два различных момента времени, для которых состояния присоединений и источников искажений (ИИ) оказываются независимыми и несвязанными друг с другом. Кроме этого, метод не может быть реализован в рамках методики измерения ПКЭ (табл. 2), поэтому его использование ограничивается случаями предварительного анализа влияния на КЭ нового присоединения [5].

Таблица 2

Интервалы измерений и усреднения результатов измерений основных нормируемых ПКЭ

ПКЭ	Интервал измерения i -го значения ПКЭ, с	Интервал усреднения, с
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U , %.	Не более 0,33 (3/9)	3
Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$, %.	Не более 0,33 (3/9)	3
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , %.	Не более 0,33 (3/9)	3
Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} , %.	Не более 0,33 (3/9)	3

Метод построения зависимости $ПКЭ = f(S_{нагр})$

В основу данного метода [5] положено использование статистической, предположительно линейной, зависимости ПКЭ от мощности включенного оборудования потребителя $S_{нагр}$ (рис. 1).

Полученная по результатам длительных измерений в ТОП зависимость $ПКЭ = f(S_{нагр})$ позволяет оценить ФВ электроэнергетической системы $ПКЭ_C$ как некоторую постоянную величину (фон системы), определяемую следующим образом: $ПКЭ_C = ПКЭ(0)$. В результате ФВ потребителя в понижение КЭ составит:

$$\Phi B_{\Pi} = ПКЭ_{тек} - ПКЭ_C,$$

где $ПКЭ_{тек}$ – текущее значение ПКЭ в ТОП.

Учитывая, что КЭ в ТОП определяется взаимным влиянием всех присоединений, то адекватность $ПКЭ = f(S_{нагр})$ как характеристики влияния одного конкретного присоединения на ПКЭ будет зависеть от уровня вносимых помех каждого присоединения. В связи с этим, применение данного метода ограничивается теми случаями, когда другие ИИ и резонансные явления в системе электроснабжения не оказывают значительного влияния на анализируемый процесс, а рассматриваемый потребитель оказывает доминирующее влияние на КЭ в ТОП [5].

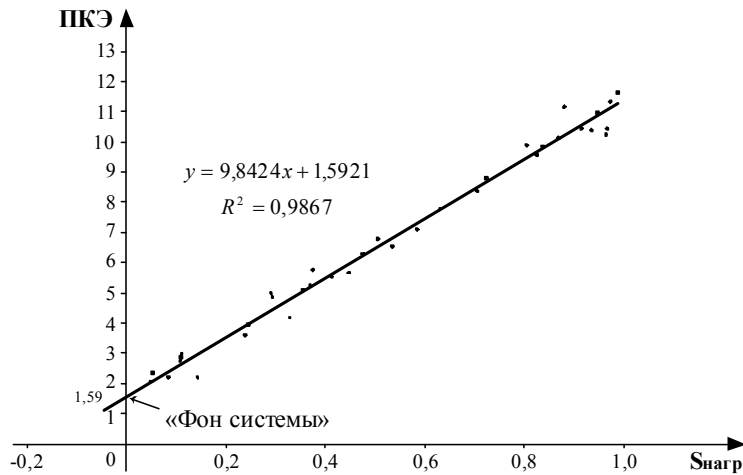


Рис. 1. Пример нахождения функциональной зависимости между мощностью нагрузки и значением ПКЭ [5]

Метод баланса вторичных мощностей

В основе данного метода [7] лежит следующее представление физики происходящих процессов: искажающая КЭ нагрузка часть своей потребляемой мощности не расходует на технологический процесс, а преобразует в виде искажений генерирует обратно в электрическую сеть (рис. 2). Отрицательное значение вторичной мощности определяет источник (генератор) искажений ЭЭ в электрической сети относительно ТОП.

Таким образом, отбрасывая положительные вторичные мощности как по активной, так и по реактивной составляющим, долевого вклада m -го присоединения в понижение КЭ относительно ТОП составит:

$$d_m = \frac{P_{\text{ем}}^{-(m)} \cdot \sum_{i=1}^k P_{\text{ем}}^{-(i)} + Q_{\text{ем}}^{-(m)} \cdot \sum_{i=1}^k Q_{\text{ем}}^{-(i)}}{\left[\sum_{i=1}^k P_{\text{ем}}^{-(i)} \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^k Q_{\text{ем}}^{-(i)} \right]^2},$$

где $P_{\text{ем}}^{-(i)}$ и $Q_{\text{ем}}^{-(i)}$ – отрицательные активные и реактивные составляющие вторичных мощностей i -го присоединения.

Следует отметить, что основная идея данного метода используется в подходах определения ФВ, ИИ и долевого участия других авторов [5, 12, 13] как основополагающая.

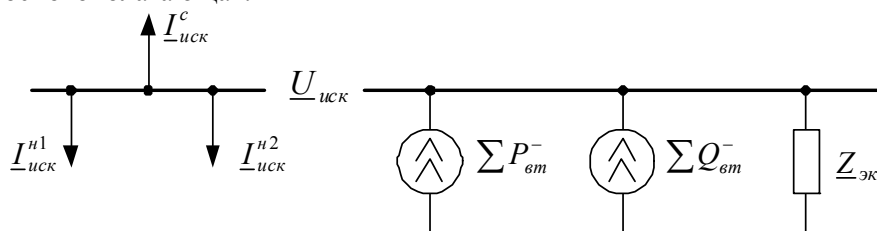


Рис. 2. Схемы замещения электрической сети по методу баланса вторичных мощностей

Так, в работе [12], предлагается оценивать вклад в уровни напряжений высших гармоник в узлах электрической сети, исходя из баланса искажающих мощностей:

$$\underline{D}_{ni}^{\text{ГС}} + \underline{D}_{ni}^{\text{ГН}} = \frac{U_{ni}}{U_{pn}} \cdot [\underline{D}_{ni}^{\text{ПС}} + \underline{D}_{ni}^{\text{ПН}}], \quad (1)$$

где $\underline{D}_{ni}^{\text{ГС}} = \underline{I}_{ni}^{\text{ГС}} \cdot U_1$ и $\underline{D}_{ni}^{\text{ГН}} = \underline{I}_{ni}^{\text{ГН}} \cdot U_1$ – генерация искажающей мощности в узле сетью

($\underline{I}_{ni}^{\text{ГС}} = \sum_{j=1}^m \underline{A}_{nij} \cdot \underline{I}_{nj}$, где \underline{I}_{nj} – эквивалентный

источник тока узла j , отражающий нелинейность нагрузки, подключенной к узлу j ; \underline{A}_{nij} – коэффициент передачи тока n -й гармоники от источника тока, находящегося в узле j , в узел i (определяется методом активного двухполюсника из режима КЗ в узле j); m – количество узлов сети) и нагрузкой ($\underline{I}_{ni}^{\text{ГН}}$) при номинальном напряжении U_1);

$\underline{D}_{ni}^{\text{ПС}} = \underline{Y}_{ni}^{\text{ПС}} U_1 / U_{pn}$ и $\underline{D}_{ni}^{\text{ПН}} = \underline{Y}_{ni}^{\text{ПН}} U_1 / U_{pn}$ – поглощаемые искажающие мощности при расчетном напряжении n -й гармонической составляющей (U_{pn}), которая связана с соответствующими проводимостями $\underline{Y}_{ni}^{\text{H}} = G_{ni}^{\text{H}} - jB_{ni}^{\text{H}}$ и $\underline{Y}_{ni}^{\text{C}} = G_{ni}^{\text{C}} - jB_{ni}^{\text{C}}$ (рис. 3).

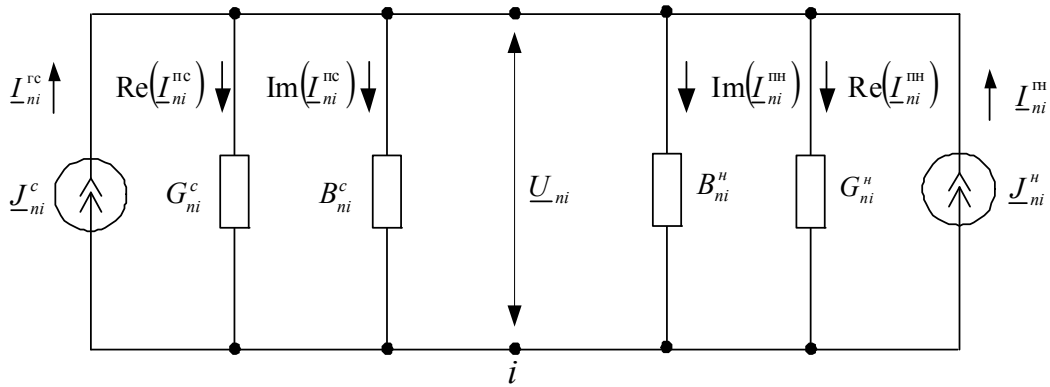


Рис. 3. Схема замещения электрической сети, использованная С. С. Смирновым и Л. И. Коверниковой

На основе выражения (1) предлагается определять вклад нелинейной нагрузки, расположенной в узле j , в напряжение n -й гармоники узла i следующим образом:

$$U_{nij} = U_{pn} \cdot \frac{\left| \underline{D}_{nij}^r \right|}{\left| \underline{D}_{ni}^{pc} + \underline{D}_{ni}^{pn} \right|}.$$

В [5] рассмотрен способ определения долевого вклада в понижение КЭ на основе анализа только активных составляющих вторичных мощностей. Так, по результатам измерений, по отрицательному знаку активной вторичной мощности среди присоединений в ТОП, выявляют ИИ и для них производится векторное суммирование токов с тем, чтобы определить значение тока I_Σ эквивалентного источника. Остальные параметры схемы замещения представляются эквивалентными пассивными сопротивлениями, модуль которого определяется по формуле:

$$Z_{BX} = U_{иск} / I_\Sigma, \quad)$$

где $U_{иск}$ – напряжение искажения.

Зная эквивалентное входное сопротивление, находят ФВ каждого k -го ИИ по выражению:

$$U_{иск k}^{\Phi B} = I_{иск k} \cdot Z_{BX},$$

где $I_{иск k}$ – ток искажения k -го искажающего присоединения.

В [13] рассматривается подход определения ИИ относительно ТОП, в котором полную мощность n -й гармонической составляющей представляют в виде трех слагаемых:

$$\underline{S}_n = \underline{S}_n^{(1)} + \underline{S}_n^{(2)} + \underline{S}_n^{(3)},$$

где $\underline{S}_n^{(1)}$ – мощность, генерируемая источниками тока n -й гармонической составляющей, расположенными в энергосистеме;

$\underline{S}_n^{(2)}$ – мощность, генерируемая источниками тока n -й гармонической составляющей, расположенными в нагрузке;

$\underline{S}_n^{(3)}$ – взаимная мощность, существующая при наличии источников тока n -й гармонической составляющей как в системе, так и в нагрузке.

Для указанных составляющих вторичных мощностей выявлены следующие закономерности. При наличии одного ИИ существует одно из трех слагаемых ($\underline{S}_n^{(1)}$ или $\underline{S}_n^{(2)}$), для которого направление вторичной мощности по каждой n -й гармонической составляющей всегда соответствует ее генерации. При наличии двух и более ИИ существуют все три слагаемых, анализ которых не позволяет однозначно определить ИИ и соответственно долевого вклад каждого присоединения.

Подводя итог анализа методов определения ФВ данной группы, можно выделить главный их недостаток: при наличии более одного искажающего присоединения относительно ТОП вторичные мощности являются следствием взаимного действия всех ИИ, которые по своему направлению не позволяют однозначно определить виновную сторону. В связи с этим использование данных методов ограничено случаями, когда в ТОП подключен единственный или доминирующий ИИ [5, 10].

Метод определения ФВ по напряжениям искажений

Основоположниками данного способа определения ФВ (В. Я. Майером и Зения) было использовано приближенное представление реальной электрической сети, в соответствии с которым пассивные нелинейные элементы были заменены активными ИИ [8]. Этот прием представления соответствует классическому случаю линейных электрических цепей с нели-

нейными источниками тока [14], в рамках которого расчет и анализ параметров режима работы сети представляется возможным вести по отдельным гармоникам и последовательностям.

Применяя принцип наложения к схемам замещения по отдельным гармоникам и последовательностям (рис. 4), соответствующие им напряжения в ТОП могут быть разложены на составляющие, отдельно зависящие от искажений каждого присоединения, и, соответственно, характеризующие долевые вклады каждого присоединения. В случае двух присоединений (энергосистемы и нагрузки) имеем:

$$\underline{U}_{nq} = \underline{U}_{nq}^c + \underline{U}_{nq}^h, \quad (2)$$

где \underline{U}_{nq} – напряжение n -й гармоники q -й последовательности.

Следует отметить, что авторы данного метода обращают внимание на то, что часть данных (\underline{Z}_{nq}^c и \underline{Z}_{nq}^h – эквивалентные сопротивления искажающего источника питания системы и нагрузки току n -й гармоники q -й последовательности), относящиеся к параметрам схем замещения, необходимых для определения \underline{U}_{nq}^c и \underline{U}_{nq}^h , следует определять расчетным путем с учетом основных допущений при расчетах токов короткого замыкания (КЗ), принятых в [15].

На основе (2) ФВ в искажение КЭ по таким ПКЭ, как K_{2U} , K_{0U} , K_U и $K_{U(n)}$ определяются следующим образом:

$$\begin{cases} K_{2U}^h = \frac{U_{(1)2}^h}{U_{(1)1}} \cdot 100\%; & K_{0U}^h = \frac{U_{(1)0}^h}{U_{(1)1}} \cdot 100\%; \\ K_{2U}^c = \frac{U_{(1)2}^c}{U_{(1)1}} \cdot 100\%; & K_{0U}^c = \frac{U_{(1)0}^c}{U_{(1)1}} \cdot 100\%; \end{cases}$$

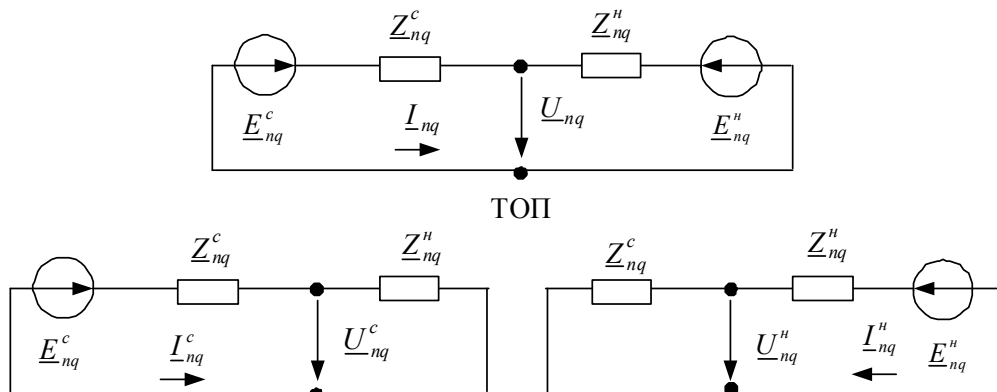


Рис. 4. Схемы замещения электрической сети, поясняющие принцип участия энергосистемы и потребителя в формировании общего искажения ЭЭ в ТОП

$$\begin{cases} K_U^h = \frac{100\%}{U_{(1)}} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} [U_{(n)}^h]^2}; & K_{U(n)}^h = \frac{U_{(n)}^h}{U_{(1)}} 100\%; \\ K_U^c = \frac{100\%}{U_{(1)}} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} [U_{(n)}^c]^2}; & K_{U(n)}^c = \frac{U_{(n)}^c}{U_{(1)}} 100\%. \end{cases}$$

К основному недостатку данного метода следует отнести получение достоверной информации об \underline{Z}_{nq}^c и \underline{Z}_{nq}^h , которую представляется возможным получить для обратной последовательности, исходя из обобщенных представлений нагрузки и системы [14]. Для нулевой последовательности эта информация может быть определена только путем вычисления и эквивалентирования сопротивлений нулевой последовательности всех элементов, которые относятся к нагрузке и системе, что в рамках методики измерения ПКЭ (см. табл. 2) технически не реализуемо.

Устранение данного недостатка возможно путем использования решения, предложенного Yang Hong Geng [5, 9]. Его отличительной особенностью является способ определения параметров схем замещения электрической сети, характеризующих сопротивления ИИ токам n -й гармоники q -й последовательности (рис. 5).

В данной модификации метода определения ФВ по напряжениям искажений предлагается определять сопротивления \underline{Z}_{nq}^c и \underline{Z}_{nq}^h по результатам двух следующих друг за другом измерений параметров режима работы сети, исходя из следующих соображений. Если изменится источник тока искажений со стороны системы \underline{J}_{nq}^c на величину $\Delta \underline{J}_{nq}^c = \underline{J}_{nq}^{c(t_1)} - \underline{J}_{nq}^{c(t_2)}$, то произойдет изменение тока \underline{I}_{nq} и напряжения \underline{U}_{nq} в ТОП на величины $\Delta \underline{I}_{nq} = \underline{I}_{nq}^{(t_1)} - \underline{I}_{nq}^{(t_2)}$ и $\Delta \underline{U}_{nq} = \underline{U}_{nq}^{(t_1)} - \underline{U}_{nq}^{(t_2)}$ соответственно.

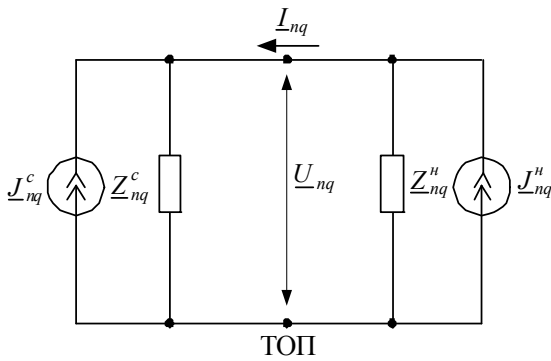


Рис. 5. Схема замещения электрической сети, использованная Yang Hong Geng

При изменении \underline{J}_{nq}^h будут иметь место аналогичные приращения тока $\Delta \underline{I}_{nq}$ и напряжения $\Delta \underline{U}_{nq}$. В том случае, если $\text{Re}(\Delta \underline{U}_{nq} / \Delta \underline{I}_{nq}) < 0$, то отношение $\Delta \underline{U}_{nq} / \Delta \underline{I}_{nq}$ определяет сопротивление \underline{Z}_{nq}^h , в случае, когда $\text{Re}(\Delta \underline{U}_{nq} / \Delta \underline{I}_{nq}) > 0$ – сопротивление \underline{Z}_{nq}^c .

Очевидно, что такой способ вычисления двух неизвестных величин \underline{Z}_{nq}^c и \underline{Z}_{nq}^h в два различных момента времени возможен только при условии: $\underline{Z}_{nq}^c = \text{const}$, $\underline{Z}_{nq}^h = \text{const}$, $\underline{J}_{nq}^c = \text{const}$ и $\underline{J}_{nq}^h = \text{var}$ или $\underline{J}_{nq}^h = \text{const}$ и $\underline{J}_{nq}^c = \text{var}$. Это условие является маловероятным в электроэнергетической системе и поэтому оно определяет главный недостаток рассмотренного метода определения ФВ.

В работе [9] проведен анализ решения, предложенного Yang Hong Geng, в результате которого выявлено, что погрешность расчетов \underline{Z}_{nq}^c и \underline{Z}_{nq}^h находится в допустимых пределах только тогда, когда приращения тока гармонической составляющей одного из ИИ в сотни раз превышает приращение тока другого. Кроме этого, выделен еще один недостаток, который касается возможного изменения линейной (неискажающей) части сопротивлений \underline{Z}_{nq}^c и \underline{Z}_{nq}^h независимо от токов \underline{J}_{nq}^c и \underline{J}_{nq}^h ИИ. Устранение указанных недостатков предлагается осуществлять путем принудительного изменения линейной части сопротивлений \underline{Z}_{nq}^c или \underline{Z}_{nq}^h в ходе активного эксперимента (рис. 6) путем использования коммутируемой батареи конденсаторов (БК).

1. Измеряются токи $\underline{I}_{nq}^{h1} = \underline{I}_{nq}^{c1} = \underline{I}_{nq}^1$ и напряжения \underline{U}_{nq}^1 при выключенной БК. 2. Осуществляется измерения токов \underline{I}_{nq}^{h2} , \underline{I}_{nq}^{c2} и напряжения \underline{U}_{nq}^2 в момент (или после) включения БК. 3. По отношению изменений напряжения $\Delta \underline{U}_{nq} = \underline{U}_{nq}^1 - \underline{U}_{nq}^2$ к изменению тока $\Delta \underline{I}_{nq}^h = \underline{I}_{nq}^{h2} - \underline{I}_{nq}^{h1}$ вычисляется сопротивление \underline{Z}_{nq}^c . 4. По отношению изменения напряжения $\Delta \underline{U}_{nq}$ к изменению тока $\Delta \underline{I}_{nq}^c = \underline{I}_{nq}^{c2} - \underline{I}_{nq}^{c1}$ вычисляется сопротивление \underline{Z}_{nq}^h . 5. По выражениям

$$\underline{U}_{nq}^c = \frac{(\underline{U}_{nq} + \underline{I}_{nq} \cdot \underline{Z}_{nq}^h) \cdot \underline{Z}_{nq}^c}{\underline{Z}_{nq}^h + \underline{Z}_{nq}^c} \quad \text{и}$$

$$\underline{U}_{nq}^h = \frac{(\underline{U}_{nq} + \underline{I}_{nq} \cdot \underline{Z}_{nq}^c) \cdot \underline{Z}_{nq}^h}{\underline{Z}_{nq}^h + \underline{Z}_{nq}^c} \quad \text{определяются со-}$$

ставляющие напряжения \underline{U}_{nq} , характеризующие долевое участие энергосистемы и потребителя в искажении КЭ в ТОП.

Адекватность модификации метода определения ФВ по искажениям напряжений, предложенная С. И. Гамазиным, аналогично модификации Yang Hong Geng, будет зависеть от следующих условий: $\underline{J}_{nq}^c = \text{const}$, $\underline{J}_{nq}^h = \text{const}$, $\underline{Z}_{nq}^c = \text{const}$ и $\underline{Z}_{nq}^h = \text{var}$ или $\underline{Z}_{nq}^h = \text{const}$ и $\underline{Z}_{nq}^c = \text{var}$, что, в общем случае, так же является маловероятным событием в электроэнергетической системе.

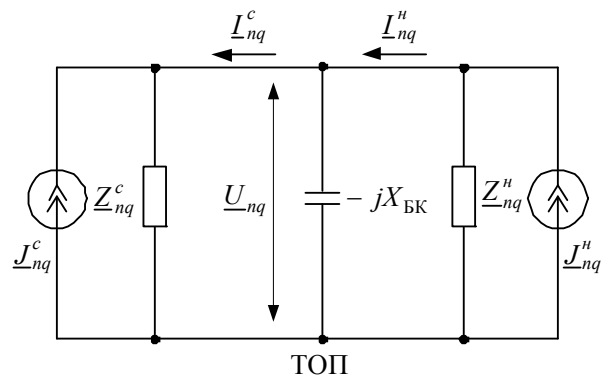


Рис. 6. Схема замещения электрической сети, использованная С. И. Гамазиным

Таким образом, область использования метода определения ФВ по искажениям напряжений ограничивается случаями, когда к ТОП подключено несколько ИИ с одним явно выраженным доминирующим присоединением по

его мощности и частоте изменения искажений. С точки зрения возможности технической реализации трудность возникает для модифицированного метода, предложенного С. И. Гамазиным, который требует постоянной коммутации БК в интервалах времени, указанных в табл. 2.

Метод определения ФВ по проводимостям искажений

Согласно данному методу для определения ФВ в понижение КЭ по несимметрии напряжений [13, 16] предлагается использовать следующие проводимости искажений:

$$\begin{cases} \underline{Y}_2^{H \text{ экв}} = \frac{1}{3} (\underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a^2 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}); \\ \underline{Y}_0^{H \text{ экв}} = \frac{1}{3} (\underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a^2 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}), \end{cases}$$

которые получаются из нижеприведенной математической модели электрической сети (рис. 7) при допущении симметрии напряжений в ТОП:

$$\begin{cases} \frac{(\underline{U}_A \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a^2 \underline{U}_C \underline{Y}_C^{H \text{ экв}})}{3} = I_1; \\ \frac{(\underline{U}_A \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a^2 \underline{U}_B \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a \underline{U}_C \underline{Y}_C^{H \text{ экв}})}{3} = I_2; \\ \frac{(\underline{U}_A \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + \underline{U}_B \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + \underline{U}_C \underline{Y}_C^{H \text{ экв}})}{3} = I_0. \end{cases} \quad (3)$$

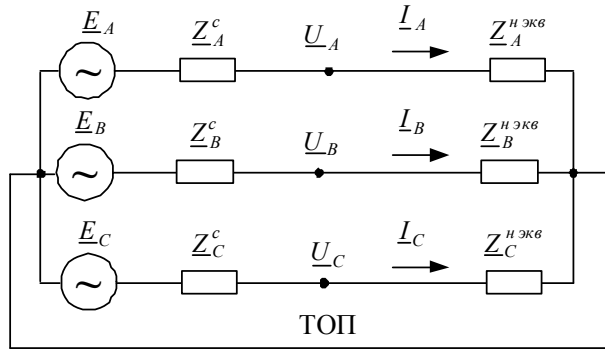


Рис. 7. Схема замещения электрической сети для анализа КЭ по несимметрии напряжений

Предполагая, что несимметричное воздействие потребителя на сеть определяется несимметрией фазных проводимостей ($\underline{Y}_2^{H \text{ экв}}$ и $\underline{Y}_0^{H \text{ экв}}$), долевое участие i -го потребителя в создание несимметрии напряжений по отдельным последовательностям может быть определено следующим образом:

$$d_2^i = \underline{Y}_2^i / \sum_{i=1}^n |\underline{Y}_2^i|, \quad d_0^i = |\underline{Y}_0^i| / \sum_{i=1}^n |\underline{Y}_0^i|.$$

Для определения ФВ в искажение КЭ по несимметрии напряжений с учетом влияния энер-

госистемы сумму долевых частей энергосистемы

$$(d_{2Y}^c) \text{ и эквивалентной нагрузки } (d_2^{H \text{ экв}} = \sum_{i=1}^n d_2^i)$$

следует принять равной единице:

$$\sum_{i=1}^n d_2^i + d_2^c = 1 \text{ и } \sum_{i=1}^n d_0^i + d_0^c = 1.$$

Рассмотрим влияние, принятого в данном методе допущения о симметрии напряжений в ТОП. Допустим, что напряжение в ТОП принимается равным напряжению прямой последовательности \underline{U}_1 и несимметричные составляющие рассматриваются отдельно. Выделим в (3) ту часть выражения, которая подлежит пренебрежению:

$$\begin{cases} \frac{1}{3} [\underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a^2 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}] + \\ + \frac{1}{3} [\underline{U}_2 \cdot \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + \underline{U}_2 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + \underline{U}_2 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}] = I_2; \\ \frac{1}{3} [\underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a^2 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}] + \\ + \frac{1}{3} [\underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + \underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + \underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}] = I_0, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_2^{H \text{ экв}} + \underline{U}_2 \cdot \underline{Y}_1^{H \text{ экв}} = I_2; \\ \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_2^{H \text{ экв}} + \underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_1^{H \text{ экв}} = I_0. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, пренебрежение вторым слагаемым в (4) даст погрешность определения проводимостей искажения $\underline{Y}_2^{H \text{ экв}}$ и $\underline{Y}_0^{H \text{ экв}}$, которая в именованных единицах будет определяться следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta \underline{Y}_2^{H \text{ экв}} = -\frac{K_{2U}}{100\%} \cdot e^{j\phi_{U_2}} \cdot \frac{(\underline{S}_1^{H \text{ экв}})^*}{(U_1)^2}; \\ \Delta \underline{Y}_0^{H \text{ экв}} = -\frac{K_{0U}}{100\%} \cdot e^{j\phi_{U_0}} \cdot \frac{(\underline{S}_1^{H \text{ экв}})^*}{(U_1)^2}. \end{cases}$$

Как следует из последнего выражения, $\Delta \underline{Y}_2^{H \text{ экв}}$ и $\Delta \underline{Y}_0^{H \text{ экв}}$ и, соответственно, погрешности определения d_2 и d_0 прямо пропорциональны коэффициентам K_{2U} и K_{0U} , а также мощности нагрузки $\underline{S}_1^{H \text{ экв}}$. Исходя из этого, область использования данного метода целесообразно ограничить случаями ТОП с маломощными присоединениями.

В результате проведенного анализа вышерассмотренных методов определения ФВ присоединений в искажение КЭ в ТОП определены их недостатки, возможность технической реализации и область использования, которые сведены в табл. 3.

© Саенко Ю. Л., Калюжный Д. Н., 2015

Таблица 3

Результаты анализа методов определения ФВ присоединений в понижении КЭ в ТОП

Метод	Параметр, используемый для определения ФВ	Недостатки математической модели	Возможность технической реализации	Область использования
1. Метод включения/отключения потребителя	Непосредственно ПКЭ	Определение ПКЭ в два различных момента времени измерений, соответствующие несвязанным друг с другом состояниям присоединений в ТОП	Отсутствует	Для предварительного анализа влияния на КЭ нового подключения в ТОП
2. Метод построения зависимости $ПКЭ = f(S_{нагр})$	Непосредственно ПКЭ	Получение достоверной зависимости $ПКЭ = f(S_{нагр})$ возможно в ТОП с одним явно выраженным доминирующим присоединением по мощности искажения КЭ	Возможно при наличии зависимости $ПКЭ = f(S_{нагр})$	В ТОП с одним явно выраженным доминирующим присоединением по мощности искажения КЭ
3. Методы баланса вторичных мощностей	Вторичная мощность	Не учет взаимного влияния искажающих присоединений друг на друга	Возможно	В ТОП с одним явно выраженным доминирующим присоединением по мощности искажения КЭ
4. Метод определения ФВ по напряжениям искажений	Напряжение искажений	Определение сопротивлений обратной и нулевой последовательностей обобщенной нагрузки и энергосистемы расчетным путем (для решения предложенного В. Я. Майером и Зения)	Отсутствует	Без ограничений
		Адекватность математических моделей определяется вероятностью изменения состояния ИИ только по одному присоединению за минимальный интервал времени измерения ПКЭ (для модификаций метода, предложенных Yang Hong Geng и С. И. Гамазиным).	Возможно	В ТОП с одним явно выраженным доминирующим присоединением по мощности и частоте искажения КЭ
5. Метод определения ФВ по проводимостям искажений	Проводимость искажений	Наличие погрешности определения долевых вкладов, которая прямо пропорционально зависит от коэффициентов K_{2U} и K_{0U} , а также мощности присоединений	Возможно	В ТОП с маломощными присоединениями, которые вызывают незначительную несимметрию напряжений

© Саенко Ю. Л., Каложный Д. Н., 2015

Выводы

1. Большинство методов определения ФВ присоединений в понижение КЭ в ТОП основаны на использовании в своих математических моделях линейного разложения схем замещения электрической сети на отдельные гармонические и симметричные составляющие. Это определяет главный их недостаток – пренебрежение взаимным влиянием ИИ друг на друга.

2. Получение для данных методов дополнительной информации о параметрах схем замещения электрической сети в координатах, отличных от фазных, вызывают затруднения как методологического, так и технического характера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шидловский, А. К. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В. Г. Николаенко. - Препринт – 253 ИЭД АН УССР. - К., 1981. – 49 с.
2. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
3. Качество электрической энергии в системах электроснабжения: учеб. пособие / О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, Д. Н. Калюжный и др. – Харьков: Харьк. нац. акад. город. хоз-ва, 2006. – 272 с.
4. Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. – 2004. – №1. – С. 66–69.
5. Тульский, В. Н. Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения : дис.... канд. техн. наук : 05.14.02 / Тульский Владимир Николаевич; Московский энергетический институт. – Москва, 2004. – 134 с.
6. Железко, Ю. С. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии / Ю. С. Железко, Е. И. Кордюков, В. Г. Курбацкий и др. // Промышленная энергетика. – 1990. – №11. – С. 52–55.
7. Зыкин, Ф. А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии / Ф. А. Зыкин // Электричество. – 1992. – №11. – С. 13–19.
8. Майер, В. Я. Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии / В. Я. Майер, Зения. // Электричество. – 1994. – №49. – С. 19–24.
9. Гамазин, С. И. Определение фактического вклада потребителя в искажении параметров качества электрической энергии / С. И. Гамазин, В. А. Петрович // Промышленная энергетика. – 2003. – №1. – С. 32–38.
10. Васильев Е. И. Определение фактического

3. Способы определения параметров схем замещения электрической сети, характеризующих ИИ по результатам измерения параметров режима работы сети, разработаны для одного из крайних случаев, когда изменение состояний ИИ относительно ТОП происходит только в одном из них.

4. Существующие недостатки рассмотренных методов, не имеющих трудностей с технической реализацией, значительно ограничивают их область использования, которая сводится к случаям ТОП с явно выраженным одним доминирующим ИИ.

REFERENCES

1. Shidlovskiy A. K., Kuznetsov V. G., Nikolaenko V. G. Ekonomicheskaya otsenka posledstviy s nizheniia kachestva elektricheskoy energii v sovremennukh sistemakh elektrosnabzheniia. [Economic evaluation of the effects of reducing the quality of electricity in modern power supply systems.]. Kiev, IED AN USSR Publ., 1981. 49 p.
2. Zhezhelenko I. V., Saenko Yu. L. Kachestvo elektroenergii na promushlennukh predpriatiiakh. [Power quality in industrial plants.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p.
3. Grib O. G., Senderovich G. A., Kaliuzhnuy D. N. and act. Kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniia. [The quality of electrical energy in power systems.]. Kharkov: Khark. nats. akad. gorod. khoz-va Publ., 2006. 272 p.
4. Chepmen D. Tsena nizkogo kachestva elektroenergii. [Price low power quality]. Energoberezhenie - Energy Saving, 2004, no.1, pp. 66–69.
5. Tulskiy V. N. Razvitie metodiki opredeleniia fakticheskogo vklada pri otsenke kachestva elektricheskoy energii v tochke obshchego prisoedineniia. Dokt. Diss. [Development of methodology for determining the actual contribution in assessing the quality of electric energy at the point of common coupling. Doct. Diss.]. Moscow, 2004, 134 p.
6. Zhelezko Yu. S., Kordiukov E. I., Kurbatskiy V. G. and act. Pravila primeneniia skidok i nadbavok k tarifam za kachestvo elektroenergii. [Rules for the application of discounts and allowances to tariffs for power quality.]. Promushlennaiia energetika – Industrial power, 1990, no.11, pp. 52–55.
7. Zukin F. A. Opredelenie stepeni uchastiia nagruzok v snizhenii kachestva elektricheskoy energii. [Determining the degree of participation in reducing the load of electric power quality.]. Elektrichestvo – Electricity, 1992, no.11, pp. 13–19.
8. Mayer V. Ya., Zeniia Metodika opredeleniia dolevukh vkladov potrebitelia i energos nabzhaiushchey organizatsii v ukhudsheni kachestva elektroenergii. [Equity method of determining the contribution of the consumer and supply organization in the deterioration of the quality of electricity.]. Elektrichestvo – Electricity, 1994, no. 49, pp. 19–24.
9. Gamazin S. I., Petrovich V. A. Opredelenie fakticheskogo vklada potrebitelia v iskazhenii parametrov kachest-

© Саенко Ю. Л., Калюжный Д. Н., 2015

вклада потребителей и системы в несинусоидальность напряжения на основе активных экспериментов : дис.... канд. техн. наук : 05.09.03 / Васильев Евгений Игоревич; Московский энергетический институт. – Москва, 2008. – 178 с.

11. Сендерович, Г.А. Визначення часткової участі суб'єктів у порушенні якості електричної енергії : автореф. дис.... д-ра. техн. наук : 05.14.02 / Сендерович Геннадій Аркадійович; Донецький нац. тех. нн-т. – Донецьк, 2012. – 36 с.

12. Смирнов, С. С. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети / С. С. Смирнов, Л. И. Коверникова // Электричество. – 1996. – №1. – С. 32–38.

13. Гриб, О. Г. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества / О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, П. Г. Щербакова и др. – Харьков: Харьк. нац. унив. радиоэлектр., 2010. – 444 с.

14. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов / Л. А. Бессонов. – 6-изд. перераб. и доп. – М.: «Высш. школа», 1973. – 752 с.

15. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970 – 752 с.

16. Сендерович, Г. А. Определение действительного вклада потребителя в создание несимметрии на сборных шинах / Г. А. Сендерович // Вісник Національного технічного університету „Харківський Політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХНІ”. – 2004. - №47. – С.136–139.

Поступила в печать 21.05.2015.

Ключевые слова: качество электрической энергии; фактический вклад; несимметрия напряжений; несинусоидальность напряжений.

va elektricheskoy energii. [Determination of the actual contribution of the consumer in the distortion of electric power quality parameters.]. Promushlennaia energetika – Industrial power, 2003, no.1, pp. 32–38.

10. Vasilev E. I. Opredelenie fakticheskogo vklada potrebitel'ey i sistemu v nesinusoidalnost napriazheniia na osnove aktivnykh eksperimentov. Doct Diss. [Determination of the actual contribution of the consumers and the system voltage based on nonsinusoidality active experiments. Doct. Diss.]. Moskow, 2008, 178 p.

11. Senderovich G.A. Vznachiennia chastkovoї uchasti subiektiv u porushienni yakosti ielektrichnoi ieniergii.Avtoreferat Diss. [Defining equity subjects in violation of the quality of electric energy. Autor's abstract.]. Donet'sk, 2012. 36 p.

12. Smirnov S. S., Kovernikova L. I. Vklad potrebitelia v urovni napriazheniia vusshikh garmonik v uzлах elektricheskoy seti. [Contribution consumer voltage levels higher harmonics in an electric network nodes.] Elektrichestvo – Electricity, 1996, no.1, pp. 32–38.

13. Grib O. G., Senderovich G. A., Shcherbakova P. G. and act. Kontrol potrebleniia elektroenergii s uchetom ee kachestva [Control of energy consumption, taking into account the quality.]. Kharkov: Khark. nats. univ. radioelektr. Publ., 2010. 444 p.

14. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. [Theory of electrical engineering.]. – Moscow, «Vussh. shkola» Publ., 1973. 752 p.

15. Ulianov S. A. Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh. [Electromagnetic transients in power systems.]. Moscow, Energiia Publ., 1970. 752 p.

16. Senderovich G. A. Opredelenie deystvitelnogo vklada potrebitelia v sozdanie nesimmetrii na sbornukh shinakh [Determination of the actual contribution of the consumer in the creation of asymmetry of the busbar.]. Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu „Kharkivskiy Politekhniichnyi institut” [Bulletin of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”.]. Kharkiv: NTU „KhPI” Publ., 2004, no.47, pp.136–139.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

Потребление и передача электрической энергии пониженного качества является причиной значительных экономических убытков как у ее потребителей, так и поставщиков. При возникновении такой ситуации ставится задача распределения финансовой компенсации убытков потерпевшей стороне между всеми участниками, виновными в понижении качества электроэнергии.

Решение данной задачи основывается на определении фактических вкладов присоединений в понижение качества электроэнергии в точке общего присоединения. На сегодняшний день существует большое количество методов различных как по методологии, так и по техническим особенностям реализации. В ходе проведенного анализа этих методов дана их классификация и определена область использования каждого из них. В результате определено, что большинство методов определения фактического вклада присоединений в понижение качества электрической энергии в точке общего присоединения основаны на использовании в своих математических моделях линейного разложения схем замещения электрической сети на отдельные гармонические и симметричные составляющие. Это определяет главный их недостаток – пренебрежение взаимным влиянием источников искажений друг на друга. Получение для этих методов дополнительной информации о параметрах схем замещения электрической сети в координатах, отличных от фазных, вызывают затруднения как методологического, так и технического характера.

Способы определения параметров схем замещения электрической сети, характеризующих источники искажения по результатам измерения параметров режима работы сети, разработаны для одного из крайних случаев, когда изменение состояний источников искажения происходит только в одном из них. Существующие недостатки рассмотренных методов, не имеющих трудностей с технической реализацией, значительно ограничивают область их использования, которая сводится к случаям точек общего присоединения с явно выраженным одним доминирующим источником искажения.

УДК 621.31

Ю. Л. САЄНКО (ДВНЗ «ПДТУ»), Д. М. КАЛЮЖНИЙ (ХНУМГ)

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська 7, м. Маріуполь, Україна, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, кафедра електропостачання міст, Україна, 61002, м. Харків, вул. Революції, 12, тел.: (050)560-68-35, ел. пошта: KalyuzhniyDN@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-7374-0734

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНИХ ВНЕСКІВ У ЗНИЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПО НЕСИМЕТРІЇ Й НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГ

Споживання і передача електричної енергії зниженої якості є причиною значних економічних збитків як у її споживачів, так і постачальників. У разі виникнення такої ситуації ставиться завдання розподілу фінансової компенсації збитків потерпілій стороні між усіма учасниками, винними в зниженні якості електроенергії.

Вирішення цього завдання ґрунтується на визначенні фактичних внесків приєднань у пониження якості електроенергії в точці загального приєднання. На сьогоднішній день існує велика кількість методів різних як за методологією, так і технічними особливостями реалізації. У ході проведеного аналізу цих методів надана їх класифікація та визначено сферу використання кожного з них. У результаті виявлено, що більшість методів визначення фактичного вкладу приєднань у пониження якості електричної енергії в точці загального приєднання засновані на використанні у своїх математичних моделях лінійного розкладання схем заміщення електричної мережі на окремі гармонійні і симетричні складові. Усе це визначає головний їхній недолік – зневага взаємним впливом джерел спотворень один на одного. Отримання для цих методів додаткової інформації про параметри схем заміщення електричної мережі в координатах, відмінних від фазних, викликають труднощі як методологічного, так і технічного характеру.

Способи визначення параметрів схем заміщення електричної мережі, що характеризують джерела спотворення за результатами вимірювання параметрів режиму роботи мережі, розроблені для одного з крайніх випадків, коли зміна станів джерел спотворення відбувається тільки в одному з них. Існуючі недоліки розглянутих методів, що не мають труднощів з технічною реалізацією, значно обмежують сферу їхнього використання, яка зводиться до випадків точок загального приєднання з явно вираженим одним домінуючим джерелом спотворення.

Ключові слова: якість електричної енергії; фактичний внесок; несиметрія напруг; несинусоїдальність напруг.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 621.31

YU. L. SAYENKO (SHEI «PSTU»), D. M. KALYUZHNIY (NUUE)

State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Universytetska Str. 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Department of Cities Electrical Power Supply, Ukraine, 61002, Kharkiv, 12 Revolutsii Str., tel.: (050)560-68-35, e-mail: KalyuzhniyDN@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-7374-0734

THE ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING THE ACTUAL CONTRIBUTION TO LOWERING THE QUALITY OF ELECTRIC POWER THROUGH ASYMMETRY AND NON-SINUSOIDAL VOLTAGE

The consumption and transmission of electric energy of lower quality cause the significant economic losses both at its customers and suppliers. In the event of such situation, the task of distributing the financial compensation for damages to the injured party between all parties that are guilty of lowering the quality of electricity is taken place.

The solution to this problem is based on the determination of the actual contributions of connections in the reduction of power quality at the point of common coupling. So far, there are many methods that are different both in the methodology and the technical implementation details. Due to the analysis of these methods that is being held, their classification is given, and the field of their application is defined. As a result, it is determined that the majority of the methods for determining the actual contribution to the reduction of interconnection of electric power quality at the point of common coupling is based on the use of their mathematical models of linear expansion equivalent circuits of the electrical network into individual harmonic and symmetrical components. This fact determines their main disadvantage; it is the ignorance of the mutual influence of sources of distortion on each other. The obtaining of additional information for these methods about the parameters of equivalent circuits of the electrical network in the coordinates different from phase ones cause the difficulties both of methodological and technical nature.

Methods for determining the parameters of the equivalent circuits that characterize the sources of distortion on results of measurement of the network parameters of the operating mode are designed for one of the extreme cases when the change of source state distortion takes place only in one of them. The current disadvantages of the examined methods that don't have difficulties in its technical implementation, significantly limit their field of application that reduces to the point of common coupling with one implied dominant source of distortion.

Keywords: power quality; the actual contribution; voltage asymmetry; voltage nonsinusoidality.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Lezhnyuk P. D.*

© Саєнко Ю. Л., Калюжний Д. Н., 2015

**ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ
ТРАНСПОРТУ**

науковий журнал

**ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ
ТРАНСПОРТА**

научный журнал

**ELECTRIFICATION
OF TRANSPORT**

scientific journal

Свідоцтво про державну реєстрацію № 17327 – 6097P від 14.10.2010 р.

ISSN 2307-4221 (print) ISSN 2312-6574 (online)

Передплатний індекс 68641

*Відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України № 793 від 04.07.2014 р.
включений до Переліку наукових фахових видань України*

Передрук матеріалів здійснюється тільки з дозволу редакції

Члени редакційної колегії здійснюють рецензування та редагування статей

Статті друкуються українською, російською та англійською мовами

Журнал представлений у науково-метричних та реферативних базах даних

INDEX  COPERNICUS
INTERNATIONAL


Ukraine



УРЖ **Український реферативний журнал**
"Д Ж Е Р Е Л О"

*Редактор: Сиченко В. Г.
Комп'ютерна верстка: Босий Д. О.*

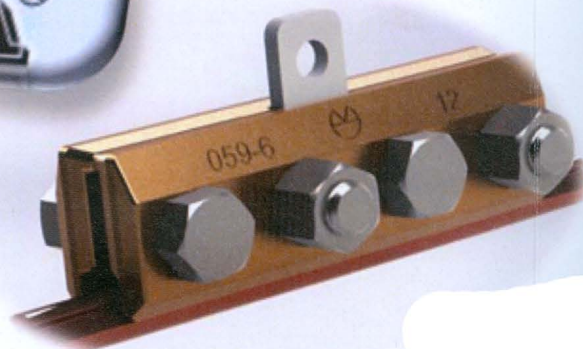
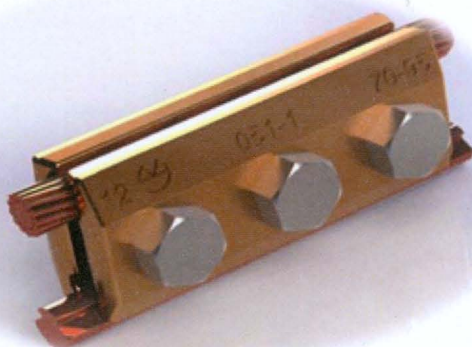
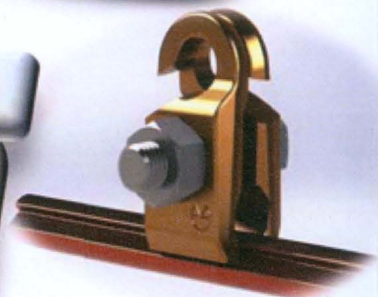
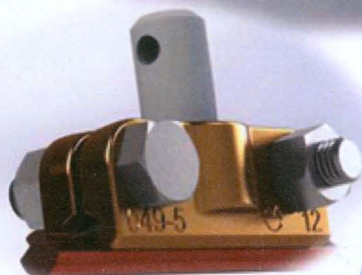
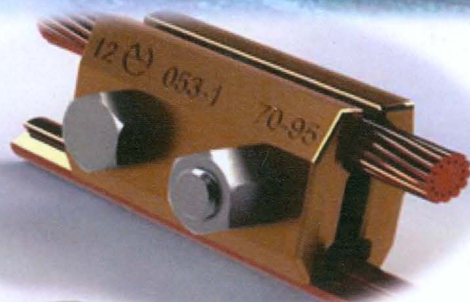
Поштова адреса:

49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2
ДНУЗТ, кафедра «Електропостачання залізниць»,
тел.: (056) 373-19-11, факс.: (0562) 47-16-74
E-mail: elpostz@i.ua URL: <http://etr.diit.edu.ua/>

Формат 60×84 1/8 Ум. др. арк. 14,8. Зам. № 205
Наклад 150 прим.

**Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна**

49010, Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2
Тел.: +38(0562) 33-58-96, факс: +38(0562) 33-58-97



2 8 6 2 3, Украина,
 Киевская обл., Васильковский р-н,
 п. г. т. Калиновка, ул. Железнодорожная, 166
 тел/факс: (044) 515-31-47; (045) 714-14-05
 тел: (050) 44-000-22
[www: vesta.ua](http://www.vesta.ua)
[e-mail: fme@vesta.ua](mailto:fme@vesta.ua)